



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Teoría de la Señal

PROYECTO FIN DE CARRERA

ALGORITMIA NO LINEAL PARA LA MEJORA DE AUDÍFONOS: PRUEBAS EXPERIMENTALES

Autora: Laura Ramírez Castaño

Tutor: Carlos Bousoño

Leganés, diciembre de 2012

Agradecimientos

Agradezco a mi hermana Belén, por tantas horas acompañándome en la silla de al lado, mientras yo estudiaba aquellos últimos exámenes y por tantas bromas en esos momentos que no podré olvidar.

También quiero agradecer a mi padre Miguel Ángel, por estimularme intelectualmente desde pequeña y ayudarme durante la carrera y a mi madre Rosi, por apoyarme y animarme en todos los momentos de mi vida.

Además, quiero agradecer a Pablo por la paciencia y apoyo mostrado durante todas esas tardes de estudio, que parecían que nunca iban a acabar.

Sin todos ellos, ahora mismo no sería la persona que soy, ni hubiera llegado hasta este momento.

Me gustaría agradecer a mi tutor Calos Bousoño y a la asociación CECUSOR, por ayudarme en la realización y finalización del proyecto. Y a todos mis amigos y compañeros de trabajo, que me han acompañado durante mi trayectoria universitaria y laboral.

Por todo eso y más. GRACIAS.

Resumen

En este proyecto se desarrollan un conjunto de soluciones para mejorar la audición de personas con disfunciones auditivas con pérdidas de audición en un rango de frecuencias determinado, como la presbiacusia y la hipoacusia, usando procesado no lineal de la señal de voz.

La mayoría de los audífonos que se comercializan en la actualidad, están basados en la amplificación de todas las frecuencias provocando efectos indeseados y molestos como los chasquidos, acoplo de otros sonidos, ecos y reverberaciones.

El objetivo de este proyecto consiste en valorar diferentes métodos elementales de procesado que solucionen los problemas de audición, para mejorar la inteligibilidad y la calidad de la audición.

La valoración se ha realizado a través de diferentes pruebas con personas con problemas de audición. Para ello, se ha desarrollado la aplicación de audiometría y otra con los diferentes métodos desarrollados en este proyecto. Por último, se ha discutido sobre el compromiso entre la mejora auditiva y la conservación de la inteligibilidad.

Palabras clave: presbiacusia, hipoacusia, pitch, pérdidas de audición, inteligibilidad.

Abstract

In this final project some solutions have been developed to improve people's audibility with hearing loss, for example, hearing loss in a determined frequency range like presbycusis and hypoacusis, using non-linear processed of voice signal.

Actually, most hearing aids sold are based on amplification of all frequencies. It causes annoying effects as clicks, coupling of other sounds, echoes and reverberations.

The aim of this project is to value different elementary methods of processed of the signal which solving hearing problems to improve intelligibility and the quality of hearing.

The valuation has been realized with several tests to persons with hearing loss. So, an application of audiometry and program application with different methods have been developed. Finally, it has been argued about the relation between audibility and intelligibility.

Keywords: presbycusis, hypoacusis, pitch, hearing loss, intelligibility.

Índice general

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Introducción	1
1.2 Motivaciones	1
1.3 Objetivo	2
1.4 Estructura del proyecto	3
2. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE.....	6
2.1. Introducción	6
2.2. Elementos de la comunicación verbal	7
2.2.1 <i>El aparato fonador como emisor de la comunicación.</i>	8
2.2.2 <i>Las características físicas del sonido</i>	9
2.2.3 <i>El aparato auditivo</i>	12
2.2.4 <i>Descripción del espectro audible del ser humano</i>	18
2.3 Problemas auditivos y sus limitaciones.....	21
2.3.1 <i>Exposición de los problemas auditivos del ser humano</i>	22
2.3.2 <i>Exposición de las posibles causas y origen de determinadas hipoacusias.</i>	24
2.3.3 <i>Descripción y delimitación de las hipoacusias y presbiacusias.</i>	25
2.4 Audífonos actuales en el mercado y estudios de problemas de audición	30
2.4.1 <i>El audífono como herramienta solución.</i>	30
2.4.2 <i>Soluciones del mercado.</i>	33
3. PROPUESTAS DE PROCESADO NO LINEAL DE LA SEÑAL DE VOZ.....	40
3.1 Introducción	40
3.2 Introducción al procesado de la señal de voz	40
3.3 Procesado de señal.	49
3.3.1 <i>Estudios de procesado lineal y no lineal</i>	50
3.3.2 <i>Técnicas de los módulos elegidos</i>	54
3.3.2.1 <i>Desplazamiento de la región deficiente en el espectro.</i>	54
3.3.2.2 <i>Búsqueda de la frecuencia fundamental</i>	55
3.3.2.3 <i>Delimitación de la región deficiente y amplificación de su espectro.</i>	59
3.3.2.4 <i>Estrechamiento/Ensanchamiento del espectro.</i>	60
4. ELECCIÓN DE LAS HERRAMIENTAS Y MEDIOS UTILIZADOS	64
4.1 Introducción	64
4.2 Descripción de las necesidades	64
4.3 Elección del lenguaje de programación utilizado.	66
4.3.1 <i>Estudios de los lenguajes de bajo nivel</i>	66
4.3.2 <i>Estudios de los lenguajes de nivel medio.</i>	67

4.3.3	<i>Estudios de los lenguajes de alto nivel</i>	67
4.3.4	<i>Análisis de los lenguajes</i>	68
4.3.5	<i>Necesidades del lenguaje</i>	68
4.3.6	<i>Descripción de posibles lenguajes</i>	69
4.3.7	<i>Elección del lenguaje</i>	73
4.4	Descripción del procesado y reproducción de la señal de audio.....	74
4.4.1	<i>Descripción de procesado de la señal de voz</i>	74
4.4.2	<i>Descripción de cómo se ha desarrollado cada módulo solución</i>	76
4.4.3	<i>Descripción de una aplicación de audiometría</i>	86
4.4.4	<i>Descripción del programa aplicación</i>	89
5.	DISEÑO DE LAS PRUEBAS Y APLICACIÓN DEL PROGRAMA	94
5.1	Introducción	94
5.2	Elección de la población muestral.....	94
5.2.1	<i>Cuestionario preliminar</i>	95
5.2.2	<i>Prueba tonal</i>	96
5.2.3	<i>Prueba verbal</i>	99
5.2.4	<i>Aplicación programa</i>	101
6.	RESULTADOS, EVALUACIÓN Y CONCLUSIONES	104
6.1	Introducción	104
6.2	Resultados	104
6.3	Conclusiones generales del proyecto	111
6.4	Líneas futuras	117
7.	PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO.....	118
7.1	Introducción	118
7.2	Planificación.....	118
7.3	Presupuesto.....	120
7.3.1	Costes directos.....	120
7.3.2	Costes indirectos	122
7.3.3	Costes totales.....	122
8.	REFERENCIAS.....	124
9.	ANEXO I.....	130
10.	ANEXO II	134
11.	ANEXO III.....	135
12.	ANEXO IV	164

Índice de figuras

Figura 1. El aparato fonador humano.	8
Figura 2. Sección transversal de la laringe.....	9
Figura 3. Diferencia entre tono agudo y grave.....	10
Figura 4. Formas de onda con la misma frecuencia pero distinto timbre.	10
Figura 5. Amplitud y periodo de una señal.	11
Figura 6. Curvas de Fletcher y Munson.	12
Figura 7. Estructura del oído humano.	13
Figura 8. Estructura del oído medio.	13
Figura 9. Estructura transversal del oído y estructura del oído interno.....	14
Figura 10. Esquema de bandas críticas del sistema auditivo humano.	14
Figura 11. Ejemplos de Ancho de Banda Crítico.....	15
Figura 12. Superficie de la cóclea.	15
Figura 13. Trayecto de las vibraciones en el oído.....	16
Figura 14: Amplitud de la vibración de la membrana basilar según las distancia a la ventana oval.	17
Figura 15: Membrana basilar desenrollada.....	18
Figura 16. Espectro de frecuencias.	19
Figura 17. Umbral de audibilidad monoaural y binaural.	19
Figura 18. Gráfico que representa el umbral de audibilidad.	20
Figura 19. Gráfico de umbral de audibilidad.	21
Figura 20. Gráfico sorderas de transmisión y percepción.....	24
Figura 21. Niveles de audición, promediados para ambos oídos, esperados en hombres en función de la edad.	28
Figura 22. Niveles de audición, promediados para ambos oídos, esperados en mujeres en función de la edad.	28
Figura 23. Relación entre el nivel de confort y la edad.....	29
Figura 24. Corneta auditiva.....	30
Figura 25. Funcionamiento del Fonófono.....	31
Figura 26, 27 y 28. Abanico. Bastón. Sombrero.	31
Figura 29. Dentophone. A. Vista frontal. B. Vista lateral. C. Forma de uso.	32
Figura 30 y 31. Diferentes modelos de Acousticon.	32
Figura 32. Audífono de bolsillo.	32
Figura 33. BTE de AVR Sonovation.	34
Figura 34. Inteo de Widex.....	35

Figura 35. Identificación de la frecuencia de mayor intensidad en la octava no audible..	36
Figura 36. Trasposición de la octava no audible a la octava inferior.	36
Figura 37. Enmascaramiento y filtrado.	37
Figura 38. SoundRecover de Phonak.	38
Figura 39. Funcionamiento de SoundRecover de Phonak.	38
Figura 40. Tipos de audífonos según su colocación.....	39
Figura 41. Onda formada por oscilador armónico.	41
Figura 42. Características principales de una onda.	42
Figura 43. Formación de una onda compleja a partir de ondas armónicas simples.....	43
Figura 44 y 45. Representación de una señal sonora y sorda respectivamente.....	44
Figura 46. Conversión analógica/digital/analógica de una señal.	44
Figura 47. Enventanado de una señal utilizando una hanning de tamaño N.....	45
Figura 48. Representación de la ventana rectangular.....	46
Figura 49. Representación de la ventana triangular.	46
Figura 50. Representación de la ventana blackman.	47
Figura 51. Representación de la ventana hamming.....	47
Figura 52. Representación de la ventana kaiser.	48
Figura 53. Amplificación de todo el espectro.	50
Figura 54, 55 y 56. Incapacidad de audición de determinadas frecuencias. Transposición de frecuencias cambiando la señal. Transposición de frecuencias entrelazando las señales.	51
Figura 57. Factor de compresión no lineal.	52
Figura 58. Compresion no lineal de un rango de frecuencias.	52
Figura 59. Ejemplo de armónicos con mayor energía que la frecuencia fundamental.	55
Figura 60. Descomposición wavelet en tres niveles.	56
Figura 61. Representación gráfica de una región muerta (1000Hz-4000Hz).	58
Figura 62. Señal original, espectro de la señal y espectro señal con región muerta amplificada.	59
Figura 63. Señal origina, espectro de la señal, espectro de señal con región muerta desplazada.	60
Figura 64a. Señal original, señal estrechada y señal remuestreada.....	62
Figura 64b. Señal original, señal ensanchada y señal remuestreada.	62
Figura 65. Señal de entrada, espectro de la señal y espectro de la señal con desplazamiento circular.....	82
Figura 66. Audiómetro que genera diferentes frecuencias de sonido.	87
Figura 67. Audiograma normal.	87
Figura 68. Aplicación Audiometría.....	88
Figura 69. Audiograma.	89
Figura 70. Curva normal (azul), curva hipoacusia de transmisión (a y b). hipoacusia neurosensorial (c, d y e).	90
Figura 71. Aplicación del programa.....	91
Figura 72. Fonemas.	92
Figura 73. Logo de CECUSOR.....	95
Figura 74. Audiograma.	97
Figura 75. Audiograma con pérdidas de audición.....	98
Figura 76. Audiograma normal.	98
Figura 77. Identificación fonemas y frecuencias.	100
Figura 78. Audiograma normal.	103
Figura 79. Población muestral.....	105
Figura 80 y 81. Audiograma normal y con pérdidas leves.....	105

Figura 82 y 83. Audiograma con pérdidas graves y plano.....	106
Figura 84 y 85. Audiograma diferente para el oído derecho e izquierdo e igual para ambos.	106
Figura 86. Porcentaje según el tipo de pérdidas de audición.	107
Figura 87. Tabla simplificada del lenguaje de los signos.	108
Figura 88 . Gráfica de Resultados por métodos	111
Figura 89. Gráfica de Resultados de los métodos con mejora.	112
Figura 90. Gráfica de Resultados de los métodos sin mejora	112
Figura 91. Gráfica de Métodos de escucha pero no entiende.	113
Figura 92. Gráfica de Métodos de mejora en función de la edad.....	114
Figura 93. Gráfica de Métodos de mejora en función del sexo.....	114
Figura 94 y 95. Gráficas del compromiso entre la calidad y la inteligibilidad.	115
Figura 96. Gráfica de Resultados de los métodos mejora.	116

Índice de tablas

Tabla 1.Nivel de confort (dBs) según la edad (años).....	29
Tabla 2.Tabla comparativa de los lenguajes.	68
Tabla 3.Ventajas e inconvenientes de Fortran.	70
Tabla 4.Ventajas e inconvenientes de Pascal.	70
Tabla 5.Ventajas e inconvenientes de Phyton.	71
Tabla 6.Ventajas e inconvenientes de C++.	71
Tabla 7.Ventajas e inconvenientes de Java.	72
Tabla 8.Ventajas e inconvenientes de Matlab.	72
Tabla 9.Ventajas e inconvenientes de Haskel.	73
Tabla 10.Niveles de intensidad para determinadas frecuencias.....	97
Tabla 11.Datos paciente.	97
Tabla 12.Tabla resumen.	110
Tabla 13.Tabla resumen Escucha pero no entiende fonemas.....	113
Tabla 14.Tabla costes directos personal.....	120
Tabla 15.Tabla costes directos equipos.....	121
Tabla 16.Tabla costes directos software.	121
Tabla 17.Tabla costes totales.	122

Capítulo 1

Introducción y objetivos

1.1 Introducción

En este capítulo se presentan las motivaciones del proyecto, se comentan los objetivos que se pretenden perseguir y se detalla la estructura del proyecto.

1.2 Motivaciones

Desde los primeros utensilios con cuernos huecos que utilizaban nuestros ancestros hasta la actualidad, han existido una gran diversidad de instrumentos para mejorar la audición.

Al principio de la evolución de los audífonos, los principales inconvenientes fueron el tamaño, el consumo de energía y el coste. Con la invención del transistor, los dos primeros inconvenientes fueron mejorados pero no solucionados.

Pero el principal inconveniente de los audífonos consistía en que sólo solucionaban problemas de audición lineales, es decir, problemas que afectan a todo el espectro de frecuencias por igual. En ocasiones, la amplificación de todo el espectro de la señal de voz, no solucionaba todos los problemas y producía efectos no deseados como el acoplamiento de la señal, ecos, reverberaciones y chasquidos.

Además, este tipo de audífonos sólo eran eficientes para problemas de audición lineales, es decir, no constituían ninguna mejora para problemas de audición no lineales, como la presbiacusia o la hipoacusia. Estas disfunciones auditivas se basan en pérdidas de audición en determinadas regiones de frecuencias.

Con el desarrollo tecnológico, aparecieron los audífonos digitales que se basaban en los conocimientos de procesamiento de señales digitales. Estos audífonos eran capaces de amplificar más eficientemente las frecuencias con un pequeño ordenador programable y procesar la señal de forma adecuada para cada paciente.

En la actualidad, se han empezado a desarrollar y comercializar audífonos que proponen solucionar problemas de pérdida de audición que no han terminado de ser totalmente eficientes, por su inteligibilidad, su coste y su mantenimiento.

Teniendo en cuenta lo expuesto, en este proyecto se valoran las bases de procesamiento de la señal de voz para mejorar la audición de las disfunciones auditivas como la presbiacusia e hipoacusia, con mejores compromisos entre la inteligibilidad y la mejora auditiva.

1.3 Objetivo

El objetivo principal de este proyecto es implementar un conjunto de métodos basados en el procesamiento digital de la señal de voz, que mejoren los problemas de audición. Además, se pretende evaluar de forma preliminar y sencilla si la audición de los pacientes mejora al aplicar los métodos basados en traslación lineal y circular, escalado y amplificación selectiva en frecuencia.

Para ello, ha sido necesario llevar a cabo los siguientes pasos:

- Análisis sobre las características principales de la audición y la voz.
- Realización de un estudio de las pérdidas de audición no lineales como la presbiacusia e hipoacusia.
- Elaboración del estado del arte sobre los audífonos y aquellos que se comercializan en la actualidad.
- Diseño de algoritmos de procesamiento de señal de voz digital.
- Diseño de aplicaciones para la realización de pruebas.
- Realización de pruebas a personas con presbiacusia o hipoacusia.
- Valoración de los resultados y definición de conclusiones.

1.4 Estructura del proyecto

La memoria está formada por los capítulos que se describen a continuación:

- Capítulo 2: en este capítulo se desarrolla el estado del arte. Se resumen las características de la voz, del oído y del sonido. Además, se realiza un resumen de las principales deficiencias auditivas para detallar las disfunciones auditivas principales del proyecto.
- Capítulo 3: en este capítulo se comentan diversas formas de procesamiento lineal y no lineal de una señal de voz, comentando diferentes estudios al respecto. También se comentan las diferentes técnicas y estrategias seguidas para implementar cada uno de los métodos elegidos y así, solucionar los problemas de presbiacusia e hipoacusia.
- Capítulo 4: en este capítulo se detallan las herramientas utilizadas en el desarrollo del proyecto. Se explican los equipos de hardware y software utilizados y una breve discusión sobre las ventajas e inconvenientes de los lenguajes de programación. Posteriormente, se detallan las razones del lenguaje de programación elegido por su mayor adaptabilidad a las necesidades del proyecto. También se precisa el desarrollo de cada uno de los métodos elegidos.
- Capítulo 5: en este capítulo se detalla el procedimiento que se lleva a cabo en la elección de la población muestral para la realización de las pruebas de este proyecto. Para ello, se comentan las diferentes fases para determinar si una persona cumple los requisitos necesarios para el estudio de este proyecto.
- Capítulo 6: en este capítulo se comentan los resultados obtenidos al realizar todas las pruebas a pacientes voluntarios susceptibles de padecer presbiacusia e hipoacusia. Además, en este capítulo se comentan las conclusiones obtenidas a partir de los resultados del proyecto.
- Capítulo 7: en este capítulo se exponen las diferentes fases en las que se divide el proyecto y el detalle del presupuesto, formado por los costes directos materiales, personales e indirectos.
- Anexos: En los anexos se precisan las fichas de los voluntarios, el cuestionario, el diagrama Gantt, las calibraciones, etc.

Los nombres que aparecen en las fichas son ficticios para conservar el anonimato de los voluntarios. Los datos personales sólo se han utilizado en este proyecto y serán custodiados adecuadamente según la ley de Protección de Datos (LOPD 15/1999, RD 1720/2007).

Capítulo 2

Revisión del estado del arte

2.1. Introducción

En este capítulo se realiza un estudio sobre las características principales de la voz, la audición y el sonido.

En primer lugar, se comentan las características principales de los elementos necesarios en la comunicación y sus limitaciones. También se describen detalladamente las funciones del oído humano y el aparato fonador, así como todas sus partes y se detalla el espectro de frecuencias de la voz humana para su posterior análisis.

En segundo lugar, se realiza un resumen de las principales deficiencias auditivas, sus causas y sus síntomas. Seguidamente, se describen en profundidad los problemas de audición objeto de este proyecto.

En tercer lugar, se describe el audífono como herramienta solución de los problemas auditivos. Posteriormente, se analizan las ventajas e inconvenientes del audífono para los diferentes problemas auditivos.

2.2. Elementos de la comunicación verbal

Antes de empezar a explicar las características de la voz y la audición, es necesario entender el significado de la comunicación verbal y de cada elemento que la compone. Este tipo de comunicación se basa en la transmisión de señales acústicas emitidas y recibidas por seres humanos.

La comunicación se compone de diferentes elementos: emisor, receptor, mensaje, código, canal y contexto. Todos estos elementos son fundamentales en el momento de establecer la comunicación verbal [\[1\]](#). A continuación, se explica la funcionalidad de cada elemento en el proceso de la transmisión de señales de voz.

El emisor es el aparato fonador que produce el mensaje verbal de la comunicación, a través de la vibración de las cuerdas vocales por el aire exhalado de los pulmones. Estas vibraciones producen diferentes sonidos que forman el mensaje de la comunicación.

El receptor es el aparato auditivo que recibe el mensaje que produce el emisor. La señal acústica que recibe el receptor se transforma en impulsos nerviosos que luego se interpretan en el cerebro.

El mensaje de la comunicación verbal es una onda sonora, emitida por el emisor, que viaja por el canal de comunicación.

El canal es el medio a través del cual se transmite o propaga el mensaje, que en el caso de la comunicación verbal, normalmente es el aire.

El código es el conjunto de reglas que deben conocer el emisor y receptor para que se produzca la comunicación, en este caso, se habla del lenguaje utilizado para transmitir la señal.

El contexto está formado por diferentes factores y circunstancias en las que se produce la comunicación. Se pueden distinguir diferentes factores como el situacional, el sociocultural y el lingüístico.

Todos estos elementos son necesarios en la comunicación verbal, la falta de alguno de éstos, provoca que la comunicación no llegue a completarse. A partir de este momento, y para simplificar, todas las menciones a la comunicación que se hacen en el proyecto son referentes a la comunicación verbal.

El conocimiento, tanto de las características del sonido como de los procesos vocal y auditivo en el ser humano, es de gran importancia para optimizar los sistemas de procesamiento de audio, por lo que se estudia posteriormente. Además, el aprovechamiento de las características perceptuales del oído, permite diseñar métodos eficientes de compresión y codificación de audio. Los aspectos perceptuales de la audición juegan un papel importante en estas técnicas y por ello es conveniente tener algunas nociones básicas sobre el comportamiento del oído y la forma en que responde a los sonidos que recibe.

En los dos siguientes apartados, se explican en detalle los tres elementos más importantes para el desarrollo del proyecto: el emisor, el receptor y el mensaje.

2.2.1 El aparato fonador como emisor de la comunicación.

Aunque todos los elementos de la comunicación son importantes, en este apartado se detalla el emisor y las particularidades de las ondas sonoras producidas por éste.

Tal y como se ha comentado anteriormente, el emisor está formado por el aparato fonador del cuerpo humano y el mensaje está constituido por la ondas sonoras producidas por éste. En la figura se muestra el aparato fonador y a continuación se explica cada uno de sus elementos:

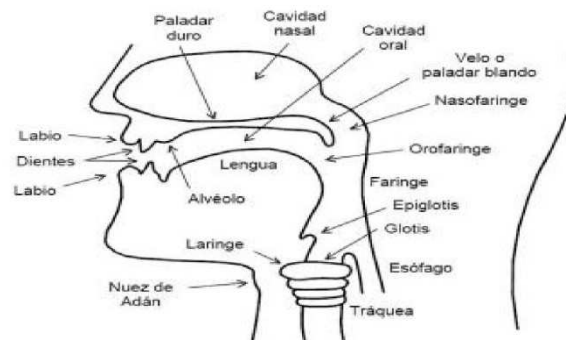


Figura 1. El aparato fonador humano.

El aparato fonador es un conjunto de órganos que intervienen en la producción de los sonidos. Está formado por los pulmones, la laringe, la faringe, las cavidades bucales, las cavidades nasales y los elementos articulados [\[2\]](#).

El proceso de fonación comienza con la espiración, cuando el aire sale de los pulmones con la presión del diafragma, los músculos intercostales y abdominales. A través de los bronquios y la tráquea el aire llega a la laringe y es allí donde el aire choca con las cuerdas vocales.

La abertura entre las cuerdas vocales se denomina glotis y dependiendo de su abertura se diferencian dos procesos: la respiración y la fonación. En este caso, el interés se encuentra cuando la glotis se cierra, porque las cuerdas vocales se juntan y el aire choca contra las cuerdas vocales produciendo una perturbación sonora inaudible.



Figura 2. Sección transversal de la laringe.

Las cuerdas vocales tienen un papel importante, puesto que vibran como lengüetas produciendo diferentes sonidos dependiendo de la velocidad de espiración del aire y de la tensión aplicada en ellas. Si la tensión de las cuerdas vocales aumenta, la frecuencia de vibración aumenta produciendo sonidos más agudos. Aunque la tonalidad de los sonidos producidos por el aparato fonador depende del tamaño y de la masa de las cuerdas vocales.

Para amplificar la perturbación sonora producida por las cuerdas vocales, el aire pasa por la faringe, las cavidades bucales y nasales que se comportan como un aparato resonador. Estos elementos confieren al sonido de una apariencia acústica, con timbres concretos y enriqueciendo con armónicos.

El sonido amplificado toma diferentes matices gracias a los elementos articulatorios que son el paladar, los dientes, la lengua y los labios. La articulación se produce mediante la interposición de un obstáculo en el flujo del aire. Dependiendo de la colocación de los labios y la lengua al expulsar el aire, se producen diferentes sonidos.

En este capítulo no se especifican las diferencias entre la colocación de los elementos articulatorios para cada consonante (glotal, bilabial, labiodental, velar, alveolar, palatal, oclusiva, fricativa) y cada vocal. Pero sí se detalla, la diferencia entre una vocal y una consonante a modo de ejemplo [3]. Para la emisión de las vocales, la vibración de las cuerdas vocales no encuentra ningún obstáculo, mientras que para las consonantes el aparato fonador crea determinados obstáculos en la salida del aire.

Según el investigador Sundberg, especialista en la voz humana, la definió como “Sonido complejo formado por una frecuencia fundamental (fijada por la frecuencia de vibración de los ligamentos vocales) y un gran número de armónicos o sobretonos”

Por este motivo, en el capítulo siguiente se describen las características físicas del sonido, para entender el concepto del mensaje que genera el aparato fonador.

2.2.2 Las características físicas del sonido

De manera general, se puede decir que el sonido es todo aquello que afecta o impresiona al órgano auditivo.

Según las leyes de la física, el sonido se puede describir como un movimiento ondulatorio generado por vibraciones de un cuerpo sonoro que se propaga en un medio elástico (generalmente el aire), debido a cambios rápidos de presión. Cualquier sonido puede describirse mediante tres características perceptuales: tono, timbre e intensidad. Estas características corresponden a tres magnitudes físicas: frecuencia, contenido armónico o forma de onda y amplitud, respectivamente [4].[7]

Para la comprensión completa de las cualidades del sonido, a continuación, se detallarán cada una de las características del sonido.

Se entiende por **tono** el número de vibraciones o ciclos por segundo que experimenta el foco sonoro al producir ondas sonoras. Como se puede ver en la siguiente figura, los sonidos agudos corresponden con frecuencias altas, mientras que los sonidos graves corresponden con bajas frecuencias.

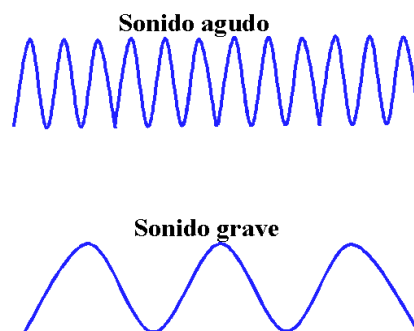


Figura 3. Diferencia entre sonido agudo y grave

El **timbre** es la característica del sonido gracias a la cual podemos distinguir dos o más sonidos que tienen igual frecuencia, pero que son generados por diferentes cuerpos. Sonidos de igual frecuencia tienen distinta forma de onda, por lo que se oye de manera diferente cada uno de ellos.

Así por ejemplo, debido al timbre o forma de onda, podemos distinguir a diferentes instrumentos musicales, aún cuando produzcan un sonido de idéntica frecuencia fundamental. El timbre de un sonido se refiere a la forma de la onda sonora y está determinado por el tipo de frecuencias armónicas que internamente conforman a un sonido.[52]

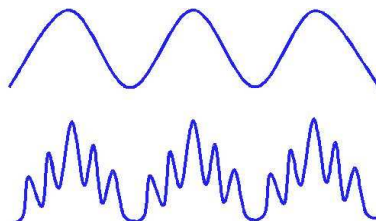


Figura 4. Formas de onda con la misma frecuencia pero distinto timbre.

Cada vibración compleja puede considerarse compuesta por una serie de vibraciones (armónico simples) de una frecuencia y amplitud determinadas. Cada una de las cuales, si se consideraran separadas, darían lugar a sonidos puros. Esta mezcla de tonos parciales es característica de cada instrumento o persona y define su timbre [50].

La **intensidad** del sonido se puede definir como la cantidad de potencia acústica que atraviesa un medio que contiene un sonido, como muestra la siguiente fórmula:

$$I = \frac{\text{Energía}}{\text{Tiempo} \times \text{Superficie}}$$

Además, la intensidad sonora depende de la amplitud del movimiento vibratorio de la fuente que lo produce. A mayor amplitud de la onda sonora, mayor es la intensidad del sonido.

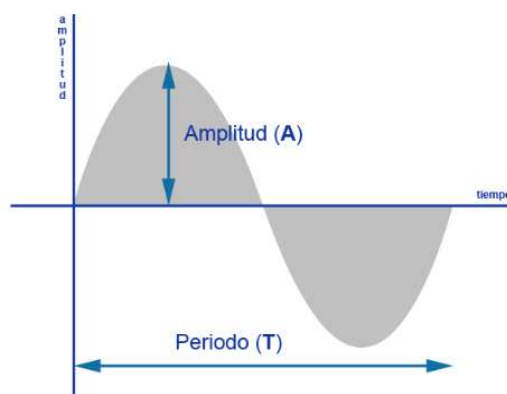


Figura 5. Amplitud y periodo de una señal.

La intensidad sonora está asociada con el nivel de presión en el medio. Ésta se mide en dBs y determina el nivel de presión que realiza la onda sonora en relación a un nivel de referencia que es $2 \cdot 10^{-5}$ Pascales en el aire.

Muchas veces la intensidad sonora es confundida con la magnitud subjetiva llamada volumen o sonoridad, que es la percepción de la intensidad sonora por cada oyente. Esta magnitud no es proporcional a la presión sonora y se expresa en fonos.

Para poder relacionar las magnitudes comentadas, la sonoridad y la presión sonora, existe una equivalencia. El nivel de volumen expresado en fonos, es numéricamente igual al nivel de presión sonora en dBs de un tono de referencia de 1000 Hz que, según la percepción de un oyente parece de la misma intensidad que el sonido que se evalúa.

Las curvas de Fletcher y Munson representan los contornos de igual volumen para tonos puros. Sobre cada una de las curvas de la gráfica siguiente, se indica el nivel de volumen de fonos y el eje de ordenadas indica el nivel de presión sonora en el aire [51].

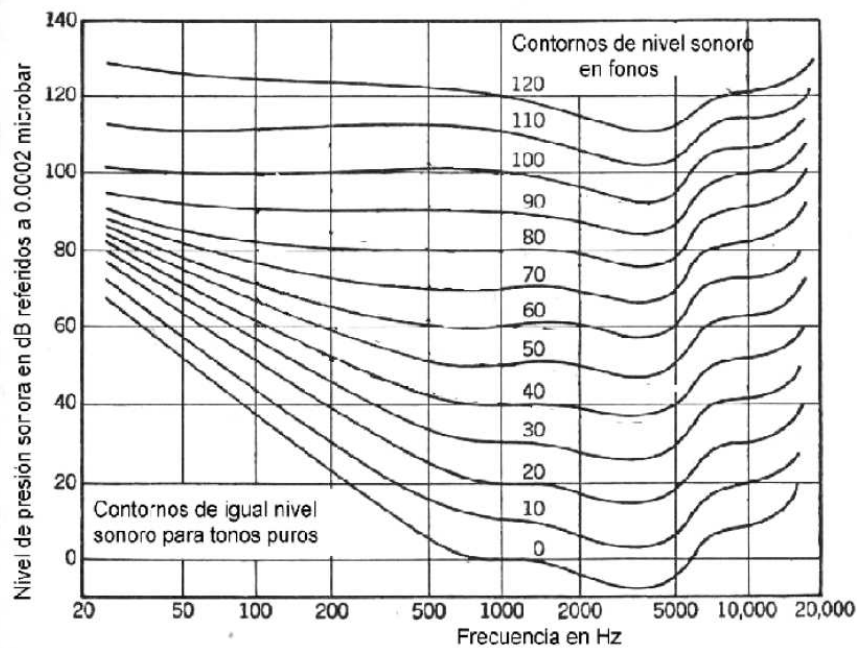


Figura 6. Curvas de Fletcher y Munson.

2.2.3 El aparato auditivo

El elemento receptor de la comunicación está formado por el aparato auditivo humano. Seguidamente, se describe en detalle la anatomía del oído y las funcionalidades de cada uno de sus componentes, debido a la gran importancia de éstos en el presente proyecto.

El oído es un complejo órgano sensorial que alberga dos sentidos: la audición y el equilibrio. Debido a la gran importancia de la audición en el proyecto, sólo se detalla el sentido de la audición.

El oído humano permite distinguir las tres cualidades del sonido comentadas anteriormente (su timbre, su tono y su volumen) debido a que actúa como transductor, convirtiendo la energía sonora en señales eléctricas, que luego se transportan al cerebro para su procesamiento, interpretación y almacenamiento. También puede distinguir la dirección de un sonido, es decir, la posición en el espacio de la fuente emisora, porque es el órgano primario del equilibrio y desempeña un papel muy importante en la sensación subjetiva de movimiento y orientación espacial.

Lo primero que se va a describir es la anatomía del oído humano, para entender qué función desempeña cada elemento.

• Anatomía del oído

El oído, tanto funcionalmente como anatómicamente, se divide en tres partes: oído externo, medio e interno. Las partes externa y media transportan las ondas sonoras

hacia el oído interno, en el que se encuentran los órganos sensoriales del sistema auditivo [5]. En la figura se muestra esquemáticamente la estructura del oído humano.



Figura 7. Estructura del oído humano.

El oído externo comprende la porción externa a la membrana timpánica y sirve para proteger al tímpano, además de recoger y dirigir las ondas sonoras hacia éste. Desempeña también un papel importante en la localización espacial de las fuentes sonoras. El oído externo incluye el canal auditivo y el pabellón de la oreja, llamado aurícula, que actúa de manera similar al reflector de una antena. El canal está compuesto de una parte cartilaginosa en contacto con la aurícula y una parte ósea interna, que termina en el tímpano y constituye la frontera entre las partes externa y media del oído [6].

El oído medio está formado por la cavidad timpánica, que incluye a la membrana timpánica o tímpano, una cadena formada por tres huesecillos y el tubo auditivo o tubo de Eustaquio. En la siguiente figura se puede observar la estructura esquemática del oído medio.



Figura 8. Estructura del oído medio.

La trompa de Eustaquio y el oído medio mantienen la misma presión del aire en ambos lados del tímpano. La pared lateral es la membrana o rampa timpánica y la pared media está compartida por el oído interno y contiene la ventana vestibular (ventana oval) y la ventana redonda o coclear, tal y como se muestra en las siguientes imágenes.

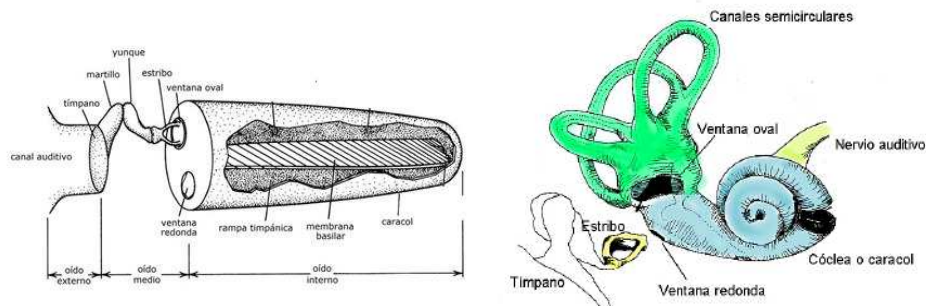


Figura 9. Estructura transversal del oído y estructura del oído interno.

El oído medio contiene tres pequeños huesecillos: martillo, yunque y estribo. Estos huesecillos forman una cadena de palancas que enlazan al oído externo con el interno y están asociados con dos pequeños músculos que ajustan la tensión del tímpano para transportar las vibraciones al oído interno para proteger a los delicados receptores del oído interno.

El oído interno, designado también como laberinto o cóclea, está constituido por un sistema complejo de conductos y cavidades llenos de líquido situados en el interior del hueso temporal del cráneo que contiene los órganos sensoriales de la audición y el equilibrio. En el interior de la cóclea está la membrana basilar que modifica su rigidez dependiendo de la frecuencia de la onda sonora.

La membrana basilar puede considerarse como un banco de filtros mecánicos que separan las componentes frecuenciales de los sonidos complejos. Los anchos de banda del proceso auditivo se designan generalmente como anchos de banda críticos.

Estos filtros se producen a lo largo de la membrana basilar y su función es aumentar la resolución de frecuencia de la cóclea y así discriminar mejor entre distintos sonidos. Las bandas críticas son rangos de frecuencia dentro de los cuales un sonido bloquea o enmascara la percepción de otro sonido, como se puede ver en la figura:

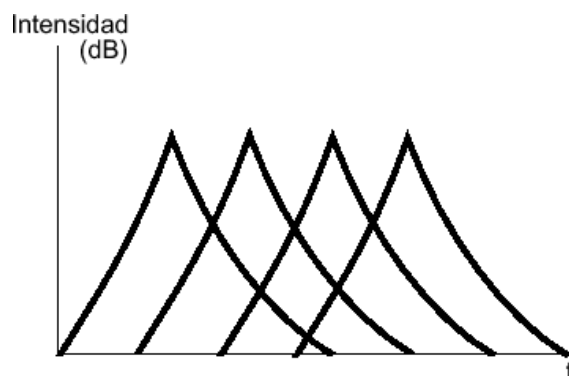


Figura 10. Esquema de bandas críticas del sistema auditivo humano.

Los anchos de banda críticos se muestran en la siguiente figura que tiene dos curvas. La curva A corresponde a la audición con un solo oído y la curva B para los dos oídos simultáneamente; ello es debido a que los anchos de banda críticos para audición monoaural (un solo oído), son ligeramente diferentes que para la audición biaural (de los dos oídos).

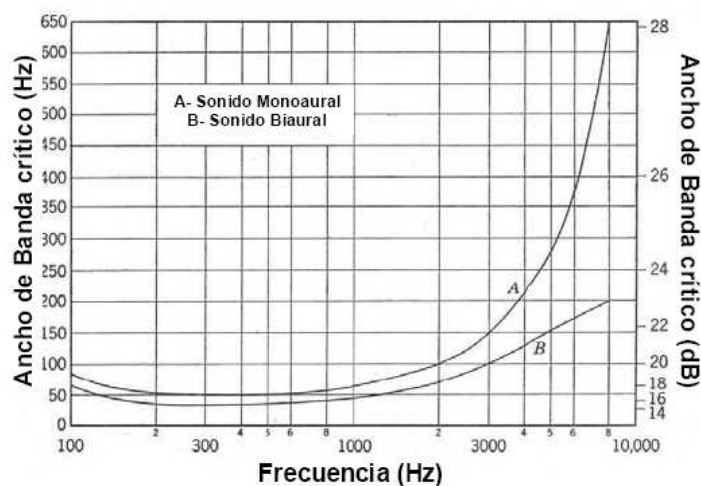


Figura 11. Ejemplos de Ancho de Banda Crítico.

Como se puede ver en la siguiente imagen, sobre la superficie de la cóclea se encuentra una estructura celular, el órgano de Corti, que contiene una serie de células con sensibilidad electromecánica, las células basilares o pilosas. Estas células son los órganos receptores que generan señales nerviosas en respuesta a las vibraciones sonoras.

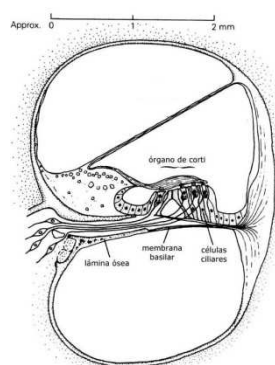


Figura 12. Superficie de la cóclea.

Las células pilosas se proyectan desde el centro de la membrana basilar hacia la pared externa y son estructuras elásticas rígidas que se encuentran fijadas a modo que uno de sus extremos, en forma de cilios o pelos, está libre y puede moverse de manera similar a la lengüeta de un instrumento musical de viento. Las células pilosas son más delgadas y pequeñas en la zona cercana a la ventana oval y más grandes y gruesas al final de la

cóclea. Como consecuencia, las fibras más cercanas a la ventana oval resuenan en altas frecuencias y las más alejadas del oído medio, resuenan a bajas frecuencias.

La cantidad de células pilosas estimuladas o deformadas y la magnitud de dicha deformación determinarán la información acerca de la intensidad de ese sonido. Todas las células auditivas responden ante frecuencias distintas logrando diferenciar las frecuencias y los tonos: altas, medias y bajas.

A continuación, se describe el proceso de audición detallando el viaje de la onda sonora por el oído.

•Funcionamiento del oído

Inicialmente, las ondas sonoras son recogidas por el pabellón de la oreja. Posteriormente esas ondas son transmitidas a través del conducto auditivo externo hasta la membrana timpánica. En este punto la membrana timpánica traspasa el patrón de vibraciones de presión hacia el oído medio y al hacer contacto con tres huesecillos se transmite la vibración hacia la ventana oval, lo que causa una onda de propagación del líquido contenido al interior de la cóclea [7].

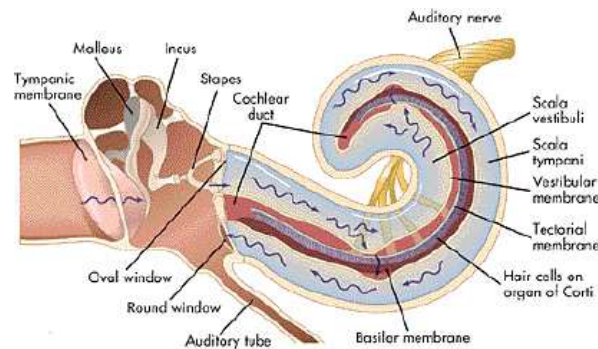


Figura 13. Trayecto de las vibraciones en el oído.

El patrón de resonancia del caracol a las diferentes frecuencias del espectro audible sigue la forma que se muestra en la figura posterior, en la que se ilustran las amplitudes relativas de la vibración de la membrana basilar, en función de la distancia desde la ventana oval en el punto de contacto con el estribo.

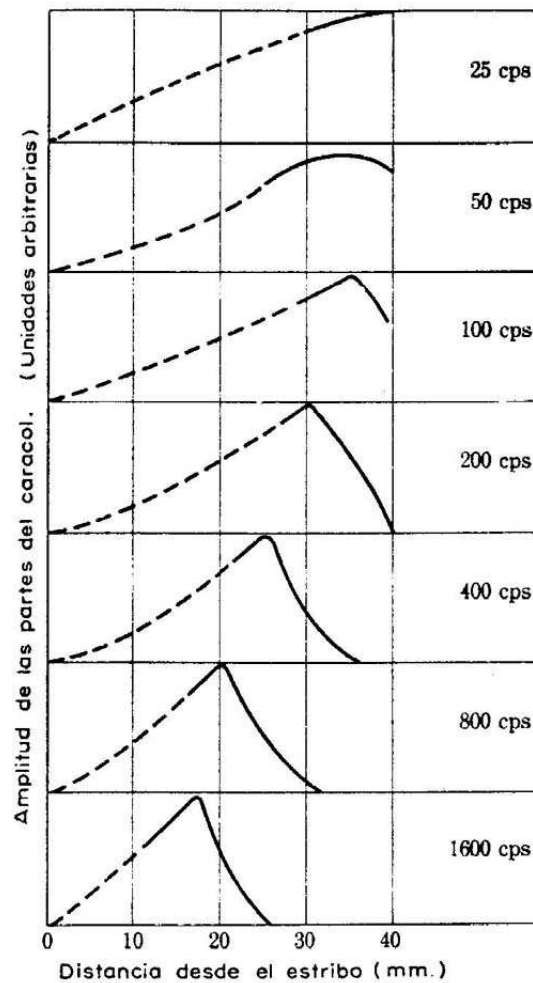


Figura 14: Amplitud de la vibración de la membrana basilar según la distancia a la ventana oval.

La membrana basilar está conectada a la ventana oval, al presionarse lentamente la ventana redonda también se ve presionada porque el volumen de líquido en el interior de la cóclea es constante. Si la ventana oval se presiona rápidamente, se produce una onda en la membrana basilar desde la ventana oval. Esta onda no puede pasar más allá de un punto determinado, dependiendo de la frecuencia a la cual vibra la membrana basilar.

El punto de mayor amplitud de oscilación de la membrana basilar varía en función de la frecuencia del sonido que genera su movimiento, produciendo así la información necesaria para la percepción de la intensidad del sonido. Las frecuencias más altas son procesadas en el sector más cercano de la membrana basilar al oído medio y las más bajas en su sector más lejano. Esto significa que los sonidos graves pueden enmascarar a sonidos agudos, pero no al revés.

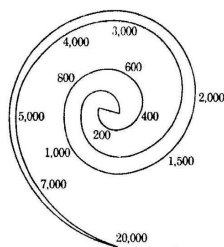


Figura 15: Membrana basilar desenrollada.

A partir de la deformación de las células pilosas en el órgano de Corti y a través de los nervios acústicos, el cerebro recibe patrones que contienen la información característica de cada sonido y los compara con otros almacenados en la memoria (la experiencia pasada) a efectos de identificarlos. Seguidamente, los impulsos nerviosos son interpretados en el centro auditivo del cerebro.

En el cerebro se encuentran neuronas que tienen la particularidad de recibir y transmitir impulsos eléctricos. Cada neurona está comunicada con otras neuronas, conformando una red (redes neurales) de intercomunicación sumamente complicada.

2.2.4 Descripción del espectro audible del ser humano

El oído humano no es capaz de registrar sonidos de cualquier frecuencia, es decir, no puede percibir sonidos emitidos con frecuencias menores a 20 Hz o sonidos con periodicidad mayor a 20.000 Hz. Así se define el rango audible humano como los sonidos con frecuencias entre 20 Hz y 20 KHz. Pero el espectro de frecuencias de las ondas acústicas es mucho más amplio. A continuación, se realiza un breve resumen sobre todo el espectro de frecuencias:

Los infrasonidos son sonidos de frecuencia inferior a unos 15 Hz y no suelen ser percibidos por el oído humano, aunque eventualmente es posible percibir las vibraciones en los tejidos blandos del cuerpo.

Los sonidos audibles se consideran a los de frecuencias comprendidas entre unos 20 Hz y 20000 Hz. La máxima frecuencia sonora que es capaz de percibir el oído humano depende de diversos factores, entre ellos la edad; por ello un niño puede percibir frecuencias cercanas a los 20 KHz y una persona de más de 60 años sólo percibe frecuencias hasta unos 10 o 12 KHz.

Los ultrasonidos son aquellos de frecuencias superiores a unos 20 KHz y pueden ser percibidos por algunos animales como los perros. No hay realmente un límite superior de frecuencia para lo que se designa como ultrasonido. En algunas aplicaciones médicas como la ecografía, se utilizan ondas ultrasónicas a frecuencias en un rango del orden de 2 a 13 MHz o superiores.

En la figura siguiente se muestra un breve resumen gráfico del espectro de frecuencias:

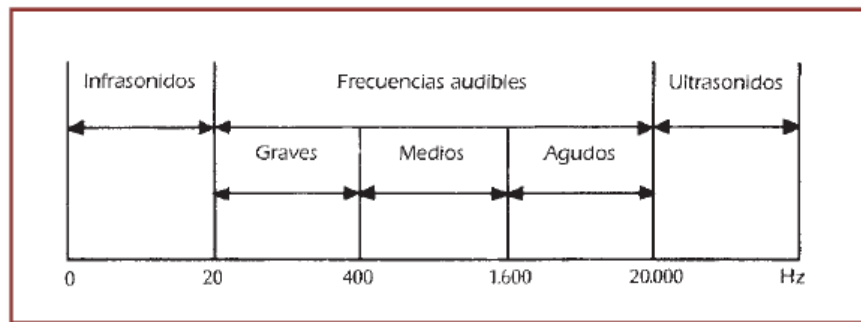


Figura 16. Espectro de frecuencias.

La voz humana, aunque tiene componentes frecuenciales bajas (inferiores a 50 Hz) y altas (superiores a 5 KHz), éstas contienen muy poca energía y, para fines de comunicaciones, el espectro útil de la voz humana se sitúa generalmente entre 300 y 3400 Hz. En esta banda está contenida la mayor parte de la energía espectral, de modo que es posible identificar fácilmente la voz del interlocutor.

Otro de los aspectos de estudio determinante de la audición humana es el umbral de audibilidad. Para una señal específica es la mínima presión sonora de esa señal, que es capaz de producir una sensación audible en ausencia de ruido. Generalmente se expresa en dB referidos a una presión de 0.0002 μ bar. El umbral de audibilidad depende de la frecuencia, de modo que a frecuencias bajas es necesaria mayor presión sonora para producir una sensación audible similar a la que se produciría a 3000 Hz en que el umbral es menor. A continuación se muestra un experimento recogido por Leo Beranek, que servirá de ejemplo para una mejor comprensión sobre los umbrales de audición [8].

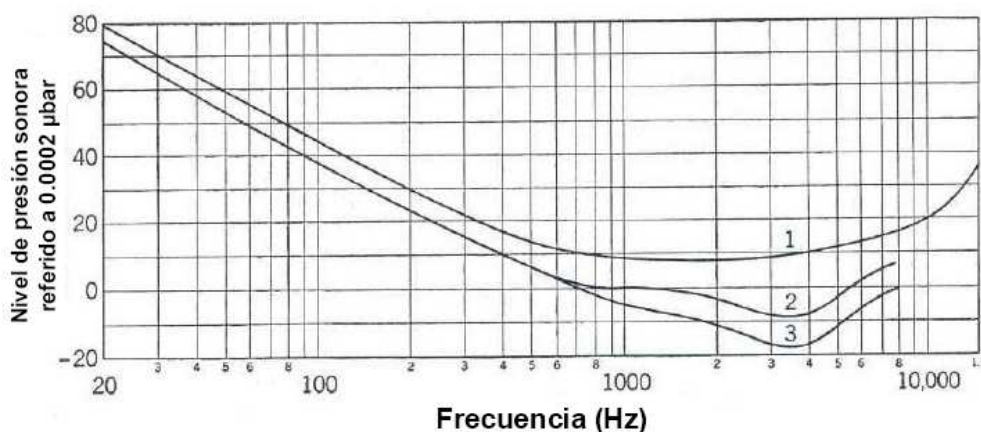


Figura 17. Umbral de audibilidad monoaural y binaural.

La curva 1 de la Figura 17 representa el umbral de audibilidad monoaural, es decir, para un oído en función de la frecuencia y cuando el sonido es producido por un auricular o audífono. En este caso la presión sonora está medida a la entrada del canal

auditivo. La curva 2 corresponde al umbral biaural y la fuente sonora está frente al oyente. Finalmente, la curva 3 representa el umbral biaural cuando la fuente sonora está constituida por varios altavoces pequeños dispuestos aleatoriamente en el plano horizontal alrededor del oyente.

El umbral de audibilidad depende de numerosos factores: la edad, la frecuencia, de cada persona e incluso del día en una misma persona.

La frecuencia máxima audible varía de una persona a otra y en general, los individuos jóvenes pueden oír sonidos hasta de 20 KHz si el tono es suficientemente intenso. Las personas de mediana edad pueden oír sonidos hasta de unos 12 a 16 KHz, siempre dependiendo de la frecuencia que se estudia.

El rango dinámico del oído humano, es decir, la diferencia entre los niveles de presión sonora más fuertes y los más débiles, es de alrededor de 120 dB. Un oyente puede detectar cambios de nivel sonoro de alrededor de 1 dB, lo que representa un cambio de 12% en la amplitud. Como consecuencia de esto, sólo hay alrededor de 120 niveles sonoros que se pueden percibir entre los sonidos más débiles y los más fuertes.

En la gráfica siguiente se muestra la existencia de un límite superior de percepción. Es decir, si el nivel del sonido aumenta considerablemente, llega a producir sensaciones molestas e incluso dolor en el oído, pudiendo llegar a producir daños físicos irreversibles.

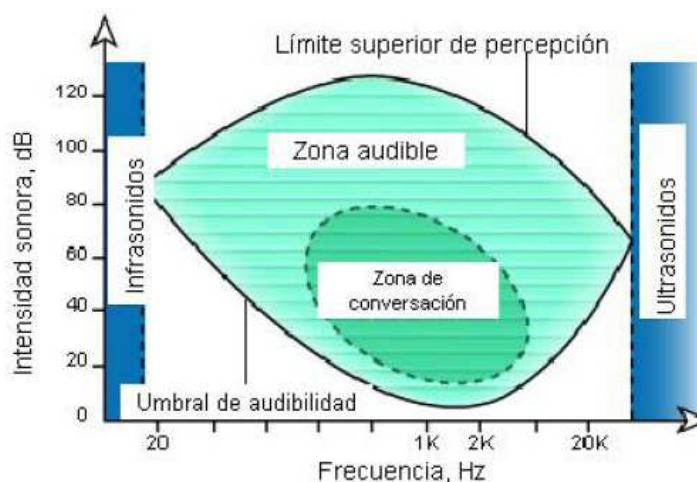


Figura 18. Gráfico que representa el umbral de audibilidad.

Los niveles sonoros del orden de 110 a 120 dB, producen sensación de molestia; de 120 a 140 dB, cosquilleo en el oído; de 140 a 150 dB, dolor y por encima de este nivel, daño inmediato al oído. Como se ha explicado anteriormente, el oído humano no es igual de sensible a todas las frecuencias. Por lo que, existen diversas curvas que resumen la sensibilidad del oído humano en función de la frecuencia, siendo las más utilizadas las curvas de Fletcher y Munson ya comentadas en el capítulo 2.2.1.

Como puede observarse en la curva de la siguiente figura, se percibe con mayor facilidad los sonidos de frecuencias más altas (sonidos más agudos). Por ejemplo, el

umbral de audición para una frecuencia de 250 Hz se sitúa alrededor de los 8 dB, mientras que para 500 Hz el umbral es de 2 dB y para 1.000 Hz es de 0 dB.

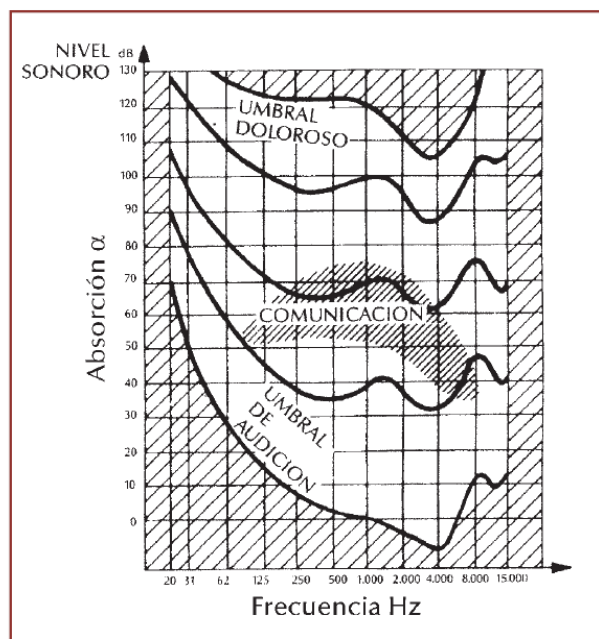


Figura 19. Gráfico de umbral de audibilidad.

La región de máxima sensibilidad acústica se encuentra comprendida en el rango de frecuencias de 3 a 4KHz, esta característica es observable con mayor facilidad en las curvas de Fletcher y Munson.

2.3 Problemas auditivos y sus limitaciones

En este capítulo se detallan las principales limitaciones del oído humano, los problemas auditivos generados por la edad, sus causas y los síntomas más evidentes.

Para comprender la cantidad de personas afectadas por la pérdida de audición, es necesario recurrir a los estudios estadísticos realizados. Según los datos de la OMS (Organización Mundial de la Salud), se calcula que 800 millones de personas en todo el mundo sufren algún tipo de pérdida auditiva. Esta cifra llegará a 1.100 millones en el año 2015, es decir, un 16% de la población mundial [9] . Según las últimas encuestas del Instituto Nacional de Estadística de España, cerca de un millón de personas padecen sordera y el 10% de la población española sufre algún tipo de problema auditivo. Además, para ayudar a todas estas personas que sufren una pérdida auditiva o hipoacusia cada año, se adaptan en España unas 150.000 unidades de audífonos.

En estas encuestas se indica que aproximadamente el 65% de las personas con pérdida auditiva sufren pérdida auditiva leve, el 30% moderada y el 5% severa o profunda. Sólo un tercio de las personas que padecen pérdida auditiva se encuentran en edad de jubilación y la mayoría son escolares o están en edad de trabajar.

Al mismo tiempo, investigadores de la Escuela de Medicina Johns Hopkins en Baltimore, han investigado la pérdida de audición entre 717 adultos de 70 años en

adelante, estudiando el uso de audífonos. Según este estudio, la edad, el género y la raza son los factores principales asociados a la pérdida de audición. Envejecer y pertenecer al género masculino parece aumentar las probabilidades de padecer hipoacusia, mientras que las personas de raza africana parecen ser menos propensos a la pérdida auditiva [10].

A continuación, se explican los principales problemas auditivos comentando los síntomas y las clases de disfunciones auditivas.

2.3.1 Exposición de los problemas auditivos del ser humano

El deterioro del oído o la pérdida de audición se entiende como una disminución completa o parcial de la capacidad de detectar o de entender sonidos. Sus causas se deben a una amplia gama de factores biológicos y ambientales que se describen con detalle más adelante [11].

Las deficiencias auditivas se pueden clasificar en función de diferentes criterios: según el lugar en el que está localizada la lesión, en función del grado de pérdida, según las causas o teniendo en cuenta el momento de aparición de la pérdida de audición [12].

• Según el grado de pérdida auditiva

Las deficiencias auditivas pueden ser de distintos grados; desde personas con pérdidas pequeñas, a personas con sordera total, incapaces de oír nada en absoluto. Los grados de pérdida auditiva con frecuencia se clasifican como leve, moderada, severa y profunda.

Los problemas que presenta cada tipo de pérdida son los siguientes:

- Pérdida leve: incapacidad para escuchar sonidos por debajo de 30 decibelios. El habla puede ser difícil de comprender, especialmente si existen ruidos de fondo.
- Pérdida auditiva moderada: incapacidad para escuchar sonidos por debajo de 50 decibelios. Es necesaria la ayuda de un audífono.
- Pérdida auditiva severa: incapacidad para escuchar sonidos por debajo de 80 decibelios. Los audífonos pueden ser útiles en muchos casos pero inadecuados en otros. Algunas personas con sordera severa se comunican mediante lengua de signos; otros prefieren utilizar técnicas como la lectura labial.
- Pérdida auditiva profunda: ausencia de la capacidad para oír o incapacidad para escuchar sonidos de menos de 95 decibelios. Como aquellas personas con sordera severa, se comunican mediante lengua de signos o técnicas como la lectura labial.

- **Según la localización de la lesión o zona afectada**

- **Hipoacusia conductiva o de transmisión:** El problema se localiza en el oído medio o externo.

Es producida por el daño o bloqueo del movimiento de las partes encargadas de reproducir el sonido en el oído. Las principales causas pueden ser porque los tres huesecillos del oído no pueden transmitir el sonido hasta la cóclea, o porque el tímpano no vibra en respuesta al sonido, debido a algún problema mecánico como la presencia de líquido en el oído. Además, algunas lesiones o enfermedades pueden provocar esta disfunción, provocando la incapacidad de la recepción de información sonora. En ocasiones, la pérdida conductiva es reversible.

A continuación se describen varias causas de la hipoacusia conductiva:

- La acumulación de cerumen.
 - La otitis media (el moco causado por alguna infección se transforma en pus en el oído).
 - El colesteatoma (se forma una masa de células epiteliales que tienen un comportamiento tumoral benigno).
 - La otosclerosis (afección causada por el crecimiento óseo que tiene lugar alrededor del estribo que provoca que los huesecillos se queden fijados gradualmente, dificultando la transmisión de las ondas sonoras desde el tímpano hasta el oído interno).
- **Hipoacusia perceptiva o neurosensorial:** La zona afectada se corresponde con el oído interno o la vía auditiva central.

Ocurre cuando el nervio auditivo (nervio coclear) está dañado o se lesiona, impidiendo que la información de la señal sonora llegue al cerebro. Este problema puede degradarse hasta convertirse en sordera total del oído o de los oídos afectados.

En general no es posible corregir una pérdida auditiva neurosensorial con un tratamiento médico o una intervención quirúrgica. Pero la alternativa más común es el uso de audífonos.

Las pérdidas auditivas neurosensoriales puede deberse a varios motivos:

- Las pérdidas auditivas debidas a la edad.
- Las pérdidas auditivas causadas por la exposición al ruido.
- Las pérdidas auditivas hereditarias.
- Las pérdidas auditivas congénitas o causadas durante el parto.
- La hipoacusia retrococlear.

Sobre las causas de la hipoacusia se hablará, en detalle, más adelante.

- Hipoacusia mixta: Con problemas tanto perceptivos como conductivos.

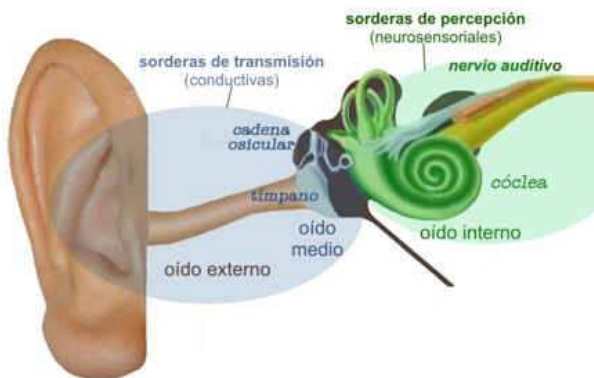


Figura 20. Gráfico sorderas de transmisión y percepción.

• **Según el momento de la aparición de la deficiencia auditiva**

- Prenatales: Son enfermedades de la madre que durante el embarazo pueden ser causa de hipoacusia en el niño, sobre todo si se dan entre la 7ª y la 10ª semana. Entre las más graves nos encontramos con la rubeola, sarampión, varicela, alcoholismo, etc.
- Perinatales: Se producen por traumatismos durante el parto, anoxia (falta de oxígeno), prematuridad, etc.
- Postnatales:
 - Prelocutivas: Se producen en un momento previo al desarrollo de las habilidades básicas de comunicación hablada. Suele ser el caso del déficit congénito o adquirido antes de los 3 o 5 años de vida.
 - Postlocutivas: La pérdida auditiva se produce tras haber desarrollado algunas habilidades básicas de comunicación por el canal auditivo, es decir después de los 5 años de edad.

2.3.2 Exposición de las posibles causas y origen de determinadas hipoacusias.

Las deficiencias auditivas en función de las causas que provocan, se denominan [13]:

- Hereditarias: Constituyen aproximadamente el 50% de los casos.
 - Recesivas: los padres son portadores de la enfermedad pero no son hipoacúsicos.

- Dominantes: constituye el 10% de las hipoacusias; uno de los padres es portador del gen afecto y es hipoacúsico.
- Adquiridas: Son las ya comentada anteriormente.
 - Prenatales: Deficiencias auditivas producidas por infecciones víricas o bacterianas como rubeola, toxoplasmosis, parotiditis, herpes zoster, citomegalia, poliomielitis, influenza, etc.
 - Perinatales: Problemas adquiridos en el momento del parto.
 - Postnatales: Deficiencias producidas por meningitis bacteriana, paperas, sarampión, rubeola, etc. Las paperas (parotiditis) constituyen la causa más frecuente de sordera adquirida en los niños.
 - Traumáticas.
 - Efecto de algunos antibióticos.
- Malformativas: Como la microsomía hemifacial (trastorno en el cual el tejido de un lado de la cara no se desarrolla completamente, lo que afecta principalmente a las regiones auditivas), síndrome de Goldenhar, etc.
- Presbiacusia: Pérdida auditiva causada por el envejecimiento.
- Pérdida auditiva debido al ruido.

Para el desarrollo del objetivo de este proyecto, en concreto se centra en el estudio de personas con presbiacusia e hipoacusia, por lo que a continuación se describe más detalladamente dichas deficiencias auditivas.

2.3.3 Descripción y delimitación de las hipoacusias y presbiacusias.

Lo primero que se debe comentar para la comprensión de las deficiencias auditivas es la diferencia entre las pérdidas de audición lineales y las no lineales. Las disfunciones auditivas lineales se producen cuando las pérdidas de audición son planas, es decir, se presentan en todas las frecuencias con la misma intensidad. En cambio, en las disfunciones auditivas no lineales, las pérdidas de audición varían en función de las frecuencias y disponen de un rango dinámico más estrecho [14] .

Este proyecto se concentrará en las disfunciones auditivas no lineales, como la presbiacusia e hipoacusia.

•Hipoacusia

La hipoacusia es la pérdida de audición parcial de determinadas frecuencias. Se caracteriza por la disminución del nivel de audición por debajo de los índices de la normalidad sólo en determinados rangos de frecuencias. Como ejemplo clarificante de hipoacusias, en este proyecto se habla en concreto de la presbiacusia.

•Presbiacusia

La presbiacusia se define como la pérdida progresiva de la capacidad para oír frecuencias altas, debido al deterioro producido en el sistema auditivo generado por la edad, principalmente en el oído interno y el nervio auditivo [15]. El proceso de envejecimiento afecta mayoritariamente a las frecuencias altas, siendo las pérdidas de audición más notables para las frecuencias de 4000 Hz. También, aparecen regiones cocleares muertas, es decir, regiones de frecuencias en las que la percepción del sonido es inferior a la normal.

La principal causa es el deterioro de las células ciliadas existentes en la cóclea. Estas células son las encargadas de procesar el sonido y enviarlo al cerebro, en forma de impulsos eléctricos acústicos, en donde es interpretado como palabras, voces, sonidos o ruidos, tal y cómo se ha explicado anteriormente.

Los principales síntomas de la presbiacusia son:

- El habla de otros parece murmullo o mal pronunciada.
- Los sonidos de tono alto como "s" y "ch" son difíciles de escuchar y distinguir.
- Las conversaciones son difíciles de entender, especialmente cuando hay ruido de fondo.
- La voz de un hombre es más fácil de oír que la inflexión alta de la voz de una mujer.
- Ciertos sonidos parecen molestos o excesivamente fuertes.
- También podría ocurrir "tinnitus" (zumbido, ronquido, o sonido de chasquidos en uno o ambos oídos).

Con la presbiacusia, los sonidos a menudo parecen menos claros e inferiores en volumen. Esto contribuye a la dificultad de audición de comprensión del habla. En los pacientes con presbiacusia es muy frecuente escuchar la frase: "oigo, pero no entiendo" y las personas que la padecen, piden por lo general a los demás que hablen más alto y pausadamente, sobre todo cuando hay ruido de fondo.

La presbiacusia ha sido clasificada en cuatro tipos, dependiendo del nivel de pérdida de la audición:

- Presbiacusia sensorial: cuando se debe a la atrofia del órgano de Corti, lo que

ocasiona una pérdida brusca de las frecuencias agudas. Por lo general afecta a personas mayores.

- Presbiacusia nerviosa: cuando se atrofia el ganglio espiral de la cóclea.
- Presbiacusia por atrofia de la estria vasculae de la cóclea. Se caracteriza porque la curva audiométrica presenta características de horizontalidad.
- Presbiacusia de conducción coclear, que se debe a la rigidez de la membrana basilar y a características de la curva audiométrica que provoca la caída de agudos.

La presbiacusia se manifiesta progresivamente, es decir, primero altera las frecuencias agudas, siendo las pérdidas de audición mayores para las frecuencias de 4000Hz y progresivamente las medias y graves, lo que contribuye a la dificultad en la comprensión del habla.

El envejecimiento produce cambios en la capacidad auditiva que pueden verse amplificados por la existencia de algunas enfermedades o por los efectos producidos después de una gran exposición a ambientes sonoros. La audición sufre un deterioro progresivo a partir de los 50 años, por lo que la presbiacusia se presenta a medida que las personas envejecen. Este trastorno representa aproximadamente a un 25% de las personas en edades entre los 65 y 75 años de edad y al 70 u 80% de los que tienen más de 75 años [16] .

Aunque este padecimiento está relacionado directamente con la edad, entre los factores que se asocian a ella, están:

- Herencia genética.
- El uso de ototóxicos, que son medicamentos que afectan al oído.
- El tabaquismo.
- El alcohol.
- La exposición constante a ruidos externos.
- Enfermedades como la diabetes y la aterosclerosis.
- Enfermedades como la osteosclerosis, es decir el agrandamiento de los huesecillos del oído medio.
- Accidentes y traumatismos.

Debido a la importancia de los numerosos factores que afectan a la disminución de la audición, resulta difícil establecer los límites del deterioro normal por envejecimiento. Según algunos estudios, como los de Spoor, la presbiacusia afecta a ambos sexos, pero tiene mayor incidencia y gravedad en los hombres. Spoor estableció

unas curvas de corrección de edad, para hombres y mujeres separadamente, a las que se han denominado "correcciones presbyacústicas", pero implican también socioacusis (pérdidas debidas a los ruidos cotidianos) y nosoacusis (pérdidas hereditarias y fármacos).

En las figuras siguientes se muestran los niveles de audición esperados (Expected Hearing Levels) combinados con las correcciones de edad de los estudios de Spoor. Las curvas indican los valores más probables de los niveles de audición esperados a una edad determinada, para hombres y mujeres que no han estado expuestos a situaciones laborales ruidosas y no presentan historial de problemas severos de oído ligados con alguna causa concreta [17] .

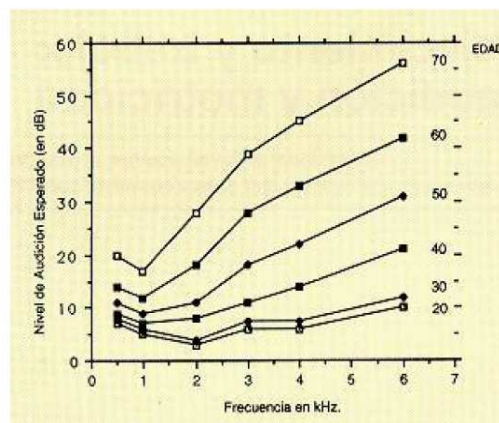


Figura 21. Niveles de audición, promediados para ambos oídos, esperados en hombres en función de la edad.

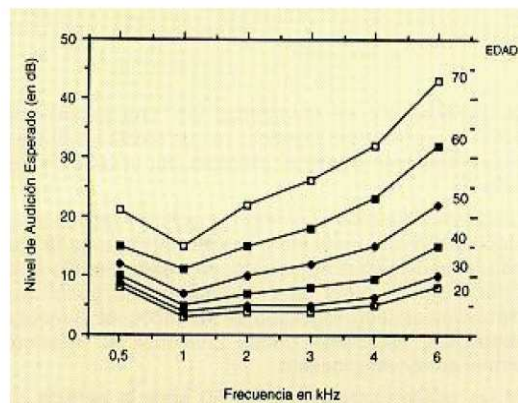


Figura 22. Niveles de audición, promediados para ambos oídos, esperados en mujeres en función de la edad.

Tal y como se puede ver en las gráficas anteriores, el nivel de audición esperado para una misma frecuencia es mayor para los hombres que para las mujeres. Por ejemplo, para personas de 60 años y para una frecuencia de 4000 Hz, las mujeres necesitan aproximadamente 23 dBs y los hombres necesitan unos 33 dBs.

Como consecuencia del deterioro gradual de la audición, la intensidad que es necesaria para que una señal auditiva sea oída y procesada con comodidad va cambiando. Lógicamente, el Nivel de Escucha de Máximo Confort está relacionado con las deficiencias auditivas, pero tiene que ver más con aspectos subjetivos, que con la inteligibilidad de la señal sonora en sí misma. El nivel de intensidad del sonido lo establece el receptor a partir de sus preferencias y a este nivel se denomina Nivel de Escucha de Máximo Confort o Nivel de Audición Confortable (Hearing Comfort Level). Para la definición de este nivel se utilizan a modo de ejemplo la escucha de conversaciones y de sonidos hablados.

Este nivel se define como el nivel al que un individuo prefiere escuchar una señal sonora para su comodidad. Con esta definición, se pone de manifiesto el carácter de subjetividad de cada persona. Los estudios sobre este nivel en función de la edad indican el incremento del nivel a medida que aumenta la edad. La relación no es lineal, tal y como se puede ver en la siguiente tabla.

Edad(Años)	Nivel de Confort(dBs)
15	53,5
20	55,2
25	56,9
30	58,6
35	60,5
40	62,5
45	64,5
50	66,6
55	68,9
60	71,2
65	73,6
70	76,2
75	78,9
80	81,7
85	84,6
90	87,6

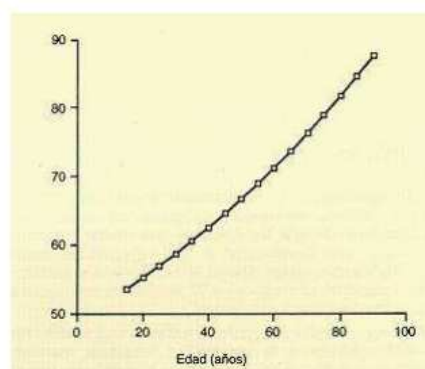


Figura 23. Relación entre el nivel de confort y la edad.

Tabla 1. Nivel de confort (dBs) según la edad (años).

Como conclusión, se puede comentar que a medida que aumenta la edad del receptor, la intensidad del sonido aumenta para conseguir un nivel de audición confortable. Entre las edades de 15 a 39 años, el aumento anual del nivel de audición confortable es de 0,335 dBs. Pero a partir de los 65 años, el aumento anual del nivel de audición confortable es de 0,56 dBs.

2.4 Audífonos actuales en el mercado y estudios de problemas de audición

2.4.1 El audífono como herramienta solución.

El audífono es un dispositivo electrónico diseñado para mejorar la audición de personas que tienen problemas auditivos. Consiste en la mejor solución para la mayoría de los problemas auditivos, pero no todos han tenido la misma funcionalidad, ni las mismas ventajas a lo largo de los años. Con el paso del tiempo y el avance de las tecnologías, se han ido modificando para adaptarse a las necesidades de cada deficiencia auditiva.

Antes de comenzar a explicar los audífonos que existen en el mercado en la actualidad, es necesario echar la vista atrás para entender los progresos y mejoras que se han logrado a lo largo de la historia, sobre los artilugios diseñados para mejorar la audición [18] .

Los primeros artilugios de los que se puede pensar que fueron los precursores de los audífonos, aparecieron en la época prehistórica y estaban formados por cuernos secos y huecos que servían tanto para producir sonidos como para escucharlos. Se habla también del uso de grandes hojas de plantas, colocadas en forma de embudo en las orejas para amplificar el sonido.

Según el doctor K.W.Berger, en una de sus publicaciones sobre los audífonos afirma, que en las ruinas de Pompeya se encontraron objetos de bronce con forma de embudo con una terminación en espiral a fin de ser colocado en la oreja [19] .

Pero se tuvo que esperar hasta 1657 para encontrar el instrumento llamado Sarvatana, que verdaderamente tenía la funcionalidad concreta de mejorar la audición, según publicó Hoefer. Este instrumento era un embudo con la parte mayor para la boca y la parte menor para el oído. También, se tiene constancia de que William Bull en 1666 se encargaba de fabricar cornetas auditivas para sordos como la que se puede observar en la siguiente figura.



Figura 24. Corneta auditiva.

Durante el siglo XIX, se encuentran numerosos inventos para mejorar la audición, como las mangueras flexibles con un embudo en un extremo y un tipo de botón perforado que podía cubrir el oído en el otro. Otro de los inventos que cabe destacar es el Fonífero inventado por Paladino en 1876, que funcionaba conduciendo vibraciones desde la laringe del emisor hasta el oído del receptor. En la siguiente figura, se muestra una imagen del funcionamiento del Fonífero [20] .

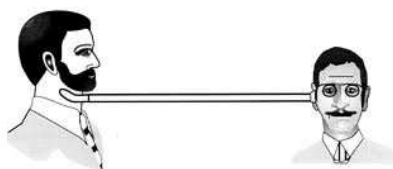


Figura 25. Funcionamiento del Fonífero.

En esta época era común encontrar artilugios para mejorar la audición simulando ser otros objetos, como se puede observar en las imágenes.



Figura 26, 27 y 28. Abanico. Bastón. Sombrero.

Johann Philip Reis construyó en 1860 un transmisor que incluía un diafragma puesto en un extremo de una corneta y utilizaba la corriente de una pila. Al variar de intensidad, se controlaba una aguja magnetizada que cambiaba de longitud generando sonidos. Pero no tuvo grandes resultados para la mejora en la percepción de la voz humana.

Uno de los inventos que marcaron la historia de los audífonos fue el teléfono. Gracias al interés de Bell en 1876 por ayudar a su mujer sorda, los resultados de los audífonos posteriores tuvieron una gran mejora aunque tuvieron que pasar algunos años hasta que se perfeccionaron.

En 1879 Richard Rhodes inventó el Dentaphone, un artilugio de madera de aspecto curvo que contenía una cuerda tensa como se muestra en la figura siguiente. El usuario lo agarraba con los dientes de tal forma que la tira de cuerda vibrara en respuesta al sonido[21].

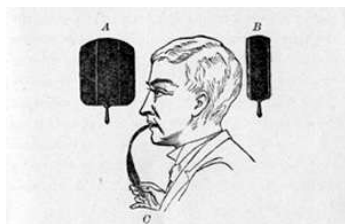


Figura 29. Dentaphone. A. Vista frontal. B. Vista lateral. C. Forma de uso.

Pero ninguno de los inventos anteriores se podían considerar audífonos propiamente dichos, ni tenían los resultados esperados. Al terminar el siglo XIX surgieron los primeros audífonos portátiles, como el Acousticon. Este aparato era del tamaño de una caja de zapatos y constaba de un transmisor, un amplificador y un aparato para colocar la pila. En los años posteriores aparecieron diferentes modelos de éste último, reduciendo su tamaño e incorporando los primeros controles de volumen. Algunos de estos audífonos se pueden observar en las siguientes figuras[22].



Figura 30 y 31. Diferentes modelos de Acousticon.

En 1934 Amplivox y Multitone produjeron unas prótesis auditivas de un kilogramo que constaban de un amplificador con batería y un receptor. Además para 1947 aparecieron los llamados circuitos impresos que significaron una miniaturización de todos los elementos de los audífonos. La invención de los transistores también supuso un cambio importante en la historia del audífono, gracias a ellos aparecieron los primeros audífonos de bolsillo.



Figura 32. Audífono de bolsillo.

En 1954 se introdujo el primer audífono que se colocaba en las patillas de un par de anteojos y entre 1985 y 1990 se desarrollaron los primeros audífonos que incorporaban tecnología digital. Sin embargo, éstos no eran audífonos realmente digitales sino que utilizaban la tecnología para aumentar sus posibilidades de calibración. A estos aparatos se les conoce como audífonos analógicos programables digitalmente o simplemente programables.

Poco a poco se empezaron a realizar estudios y a conocer el funcionamiento del oído, por lo que se percataron de la problemática de la amplificación lineal. En los primeros años de la década de los 90, se comenzó a utilizar la amplificación que variaba de acuerdo con la señal entrante.

Asimismo, la continua miniaturización de los audífonos produjo la aparición de los CIC (Completely In the Canal), es decir, audífonos insertados en el oído. Las impresiones que se obtenían eran con buena calidad pero inestables y las reparaciones excesivamente costosas.

Finalmente, en 1995 se desarrollaron audífonos con procesamiento digital. La diferencia principal entre un audífono digital y uno analógico, es que el digital posee en su interior una computadora que es capaz de convertir el sonido que percibe en formato binario para ser analizado y modificado. Para el desarrollo de este proyecto, este hito es verdaderamente importante como ya se verá más adelante.

Los audífonos que existen en la actualidad son audífonos digitales, aunque cada uno tiene diferentes características, se han ido modificando según el conomiento médico obtenido sobre las disfunciones auditivas hasta el momento. En el apartado siguiente, se explican algunos estudios y razones que han llevado a diseñar los audífonos que existen actualmente en el mercado.

2.4.2 Soluciones del mercado.

Con el avance de la tecnología y los conocimientos adquiridos hasta el momento, han habido diversas investigaciones que se han materializado en el diseño de multitud de audífonos que todavía se comercializan en la actualidad. A continuación, se comentan los estudios y audífonos principales.

Las pérdidas de audición de frecuencias altas, el espectro acústico de las consonantes sordas, la dificultad de proporcionar una amplificación suficiente para las frecuencias altas, la existencia de regiones cocleares muertas y los límites de frecuencia de los audífonos, hizo pensar a los investigadores que los audífonos serían más eficientes si se modificaba el espectro del sonido.

Los primeros estudios que se realizaron tenían como objetivo resolver los problemas de audición, que una simple amplificación no solucionaba. Los investigadores se planteaban si era posible que la energía del sonido en las altas frecuencias se pudiera

pasar a frecuencias más bajas, donde los umbrales de audición eran mejores. Pero los resultados que se obtuvieron fueron sonidos antinaturales que no aportaban ningún tipo de información audible, puesto que se degradaba el sonido [23] .

En los audífonos analógicos de antes, el límite del ancho de banda de los sonidos agudos solía estar limitado por el rendimiento electroacústico. Es decir, los audífonos con una alta potencia tenían problemas para obtener valores de presión sonora de salida por encima de 4 kHz. Con los avances tecnológicos estas limitaciones de ancho de banda han sido superadas.

A partir de estos estudios, tres empresas fueron las pioneras en diseñar diferentes audioprótesis que tenían como objetivo común solucionar algunos de los problemas de audición. Los dispositivos digitales que hay en la actualidad se basan en los modelos que se comentan a continuación y sus versiones mejoradas.

• AVR Sonovation

En 1998, la empresa AVR Sonovation presentó un audífono BTE colocado detrás de la oreja con un sistema de amplificación FM diseñado para el uso personal. El BTE consistía en una caja con un sistema de amplificación, un tubo y un molde que se colocaba detrás del pabellón auditivo. El sonido era enviado desde la caja del audífono al molde del oído a través del tubo para evitar problemas de retroalimentación [24].



Figura 33. BTE de AVR Sonovation.

Los principales inconvenientes que presentaban los primeros audífonos de AVR Sonovation eran:

- Receptores y transmisores grandes y pesados.
- Los equipos eran caros (en comparación con otros equipos de amplificación).
- Las transmisiones de señales FM tenían interferencias cuando había otros aparatos electrónicos cerca.
- Los equipos se estropeaban con facilidad.

En las posteriores versiones se han mejorado la mayoría de los inconvenientes, convirtiéndose en una buena opción cuando el entorno es ruidoso y cuando la distancia entre el emisor y el receptor es considerable.

En las versiones posteriores se pueden cambiar las frecuencias superiores a las inferiores, comprimir frecuencias, etc. Esta compresión de frecuencias mantiene la relación entre los sonidos adyacentes no modificados. Es decir, si un sonido del habla, como el sonido / s /, tiene algunos picos de energía en 3000, 4000, 6000 y 8000 Hz, y el compresor de frecuencia utiliza un factor de dos, los picos se reducen a la mitad en

frecuencia, en 1500, 2000, 3000 y 4000Hz respectivamente. De esta forma, posiblemente la información sonora será audible para personas con pérdidas de audición de frecuencias altas.

AVR Sonovation realizó diferentes estudios en los que demostró que la percepción del habla se ve menos afectada por las variaciones y degradaciones acústicas cuando la relación de proporción entre picos de energía es constante. Otro de los aspectos de estudios era la diferencia entre los resultados entre los hombres y las mujeres. Por ejemplo, el formante /ee/ si es pronunciado por un hombre los picos de energía se situarían en 200 y 2000 Hz, si es una mujer sería en 300 Hz y 3000 Hz y si es un niño en 400Hz y 4000Hz. Si la relación de compresión es la adecuada se debería obtener los mismos resultados siendo indiferente el emisor.

Esta teoría es la que hace desarrollar el audífono AVR Transposer de la misma empresa, basado en la compresión de frecuencias proporcional y ajustable, dependiendo de la pérdida de audición. Este sistema funciona mediante el análisis de la señal de voz y la determinación de los sonidos sordos o sonoros. Si no tienen voz, lo que significa que es una consonante de alta frecuencia, la frecuencia del sonido es comprimida en un factor pre-establecido. Cuando el sonido es sonoro utiliza una amplificación programada.

El inconveniente de este audífono es la dificultad para detectar los sonidos sordos y sonoros en tiempo real para el posterior análisis, puesto que se creaba un retardo molesto en el procesado del sonido. Además, la amplificación producía efectos indeseados como chasquidos y ruidos molestos.

Hubo una serie de informes clínicos que demostraban resultados favorables en general, pero suponía un estudio individualizado para obtener resultados completamente satisfactorios. Así mismo, las preocupaciones estéticas no eran del todo cuidadas por esta empresa, por lo que no hubo una aceptación general de estos dispositivos digitales.

• Widex

Hace unos años, Widex presentó un Extensor de audibilidad (AE) integrado en un audífono llamado Inteo que se puede ver en la siguiente figura. Principalmente, el AE trasfiere los sonidos de alta frecuencia no audibles a regiones de baja frecuencia audibles [25].



Figura 34. Inteo de Widex.

La principal característica de este audífono es la cantidad de sistemas integrados en el audífono, puesto que incluye un Procesador de Señales Integrado (ISP) y un Integrador Dinámico (DI). El DI se encarga de encontrar información sobre la pérdida de

audición para encontrar la frecuencia inicial y final de la región de problemas auditivos y el ISP puede procesar los sonidos una octava por encima de la frecuencia inicio.

Por ejemplo, la frecuencia donde el paciente deja de percibir puede ser 2500 Hz y entonces el programa identifica una frecuencia con mayor intensidad en la octava no audible por encima de la frecuencia de inicio, tal y como se puede observar en la siguiente figura.

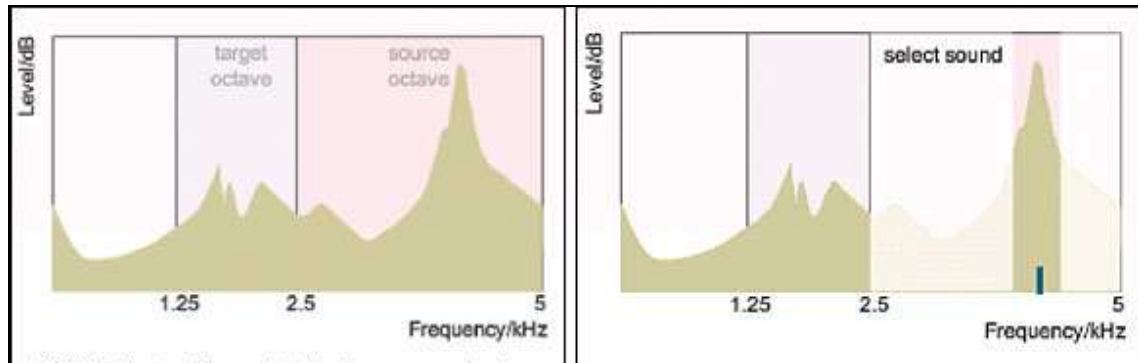


Figura 35. Identificación de la frecuencia de mayor intensidad en la octava no audible.

Posteriormente, el AE realiza una trasposición de la frecuencia de mayor intensidad a la octava inferior de la frecuencia mínima (en este caso, desde 1250 Hz a 2500 Hz). De esta manera, la señal transportada es probable que sea colocada en una región donde la audición es posible como se puede observar.

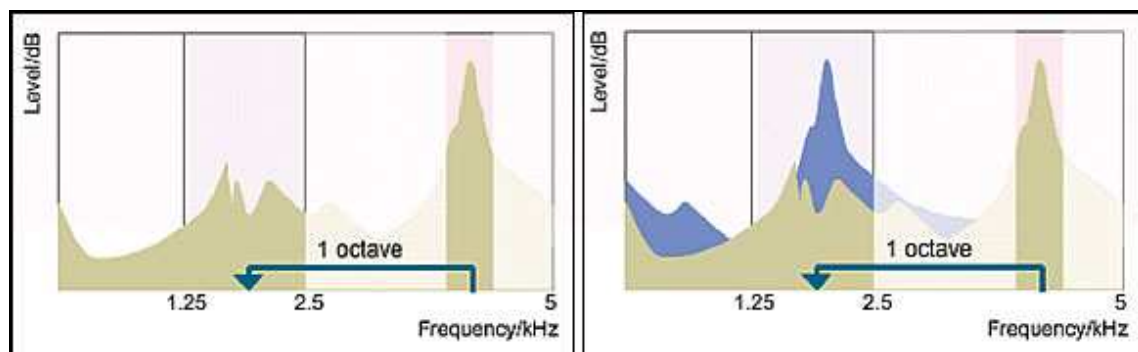


Figura 36. Trasposición de la octava no audible a la octava inferior.

Las frecuencias adyacentes a la frecuencia de mayor intensidad se trasponen de forma lineal en la octava inferior, produciéndose un enmascaramiento de frecuencias. Para limitar el efecto de enmascaramiento de la señal de transposición, las frecuencias que están fuera del ancho de banda de una octava se filtran haciéndolas desaparecer como se ve en la imagen.

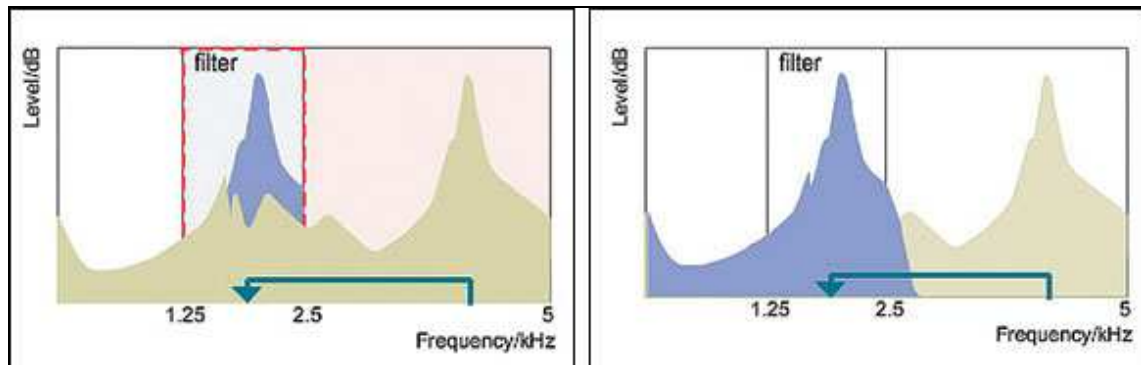


Figura 37. Enmascaramiento y filtrado.

El gran inconveniente de este audífono es la identificación de la frecuencia de inicio. Si es demasiado bajo, entonces la ayuda de audición no será útil, y si es demasiado alto, entonces la información importante no será incorporada [26]. Además, según el doctor Francisco Kuk de Widex, es necesario un periodo de adaptación de unos meses en el peor de los casos para que el rendimiento sea favorable, puesto que puede crear distorsión y confusión al paciente [27]. Otro de los inconvenientes es la percepción de la voz mecánica, es decir, poco natural.

Las principales ventajas del producto de Widex respecto a los productos anteriores son:

- No discriminar según la sonoridad. Se incorpora sólo los sonidos de alta frecuencia (por encima de la frecuencia de inicio), independientemente de sus características de sonoridad (por ejemplo, sorda o sonora). Por lo tanto, es igualmente eficaz en las señales periódicas y aperiódicas.
- Es activo durante todos los segmentos de discurso y no en determinados segmentos lingüísticos.
- Limita la cantidad de enmascaramiento y evita la necesidad de compresión.
- La conservación de la relación armónica entre la señal original y la señal transpuesta.
- La señal de transposición se mezcla con la señal original para dar una percepción del sonido más natural aunque no terminan de ser una mejora consistente.

• Phonak

Otro de los dispositivos digitales que es necesario mencionar es el SoundRecover (SR) de Phonak que combina varios aspectos, comprime señales de alta frecuencia y realiza cambios a una región de frecuencia inferior [28]. Este audífono se puede observar en la siguiente figura.



Figura 38. SoundRecover de Phonak.

El SoundRecover (SR) tiene como función comprimir las señales de voz por encima de alguna frecuencia de corte pre-seleccionada e incorporar los cambios de este sonido de alta frecuencia en una región de la frecuencia en la que hay audición residual utilizable.

El SR reduce la frecuencia máxima de entrada hasta encontrarse dentro del ancho de banda útil del audífono cuando se adapta adecuadamente a una persona con deficiencia auditiva. Sólo las frecuencias por encima de la frecuencia de corte se comprimen conservando la calidad de los sonidos de las frecuencias bajas como se puede observar.

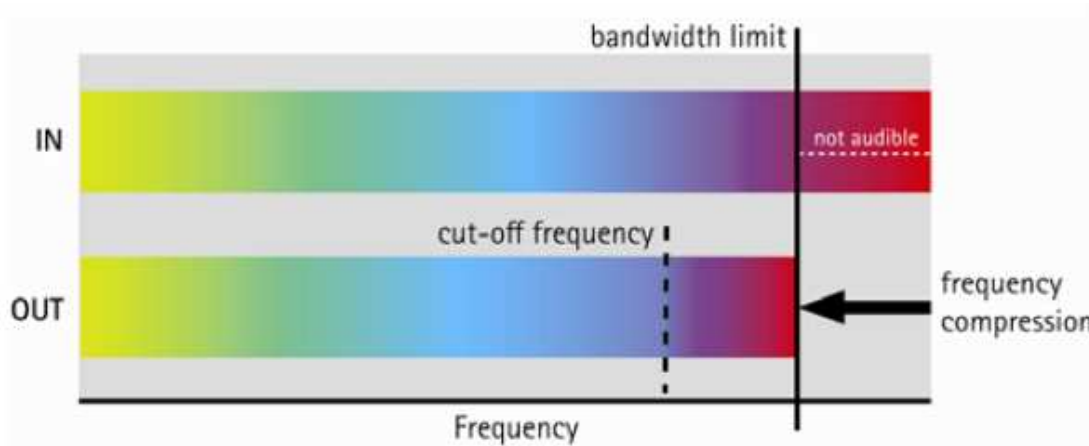


Figura 39. Funcionamiento de SoundRecover de Phonak.

En varios estudios de investigación realizados por Glista y Wolfe en 2009, se ha confirmado que el uso de SR mejora a menudo la inteligibilidad verbal, tanto en ambientes tranquilos como en ambientes con ruido, y con una calidad de sonido del procesamiento aceptable, aunque no completamente exitosa. Además, el ancho de banda del propio audífono no es suficiente para ampliar el ancho de banda de percepción.

Posteriormente, han habido algunas mejoras de estos audífonos pero no han conseguido superar por completo todas sus debilidades. En la actualidad, los audífonos se pueden clasificar según su lugar de colocación, la potencia y su adecuación al paciente. Seguidamente, sólo se detalla la clasificación según su colocación porque las demás clasificaciones no son relevantes para el desarrollo de este proyecto.

Los tipos de audífonos que se encuentran en la actualidad son los que se pueden ver en la figura siguiente:



Figura 40. Tipos de audífonos según su colocación.

- Retroauriculares (BTE): son los dispositivos digitales que ofrecen una mayor portancia, destinados a personas con pérdidas moderadas-severas. Al ir detrás de la oreja, es necesario un tubo para conducir el sonido hasta el interior del oído y un molde a medida para sellar el conducto auditivo.
- Open-Fit: son aquellos que van detrás de la oreja pero van dirigidos a usuarios con pérdidas leves-moderadas-graves. Estos audífonos tienen tamaño pequeño y un tubo fino como un palillo dental hasta el interior del canal auditivo.
- RIC/RITE: son similares a los BTE que están destinados a personas con pérdidas moderadas-severas. Estos dispositivos tienen una colocación especial, pues se coloca el auricular en el canal auditivo permitiendo obtener una mayor ganancia para frecuencias agudas y evitando pitidos molestos.
- Concha (ITE): son dispositivos que se alojan dentro del oído y ocupan toda la concha y parte del canal auditivo. Poseen una potencia mayor que los ITC convencionales pero su valor estético les hace estar en desuso.
- Intrauriculares (ITC): son los que se colocan dentro del canal auditivo, poseen una potencia inferior a los audífonos retroauriculares porque el conducto auditivo de una persona no dispone de un espacio tan amplio.
- CIC: se colocan completamente en el canal auditivo y son de menor tamaño que los ITC. Van dirigidos a usuarios con pérdidas leves.

Una vez que se han comentado los audífonos que se comercializan en la actualidad, en el capítulo siguiente se explicarán los principales conceptos del procesamiento de la señal de voz.

Es necesario comentar que el objetivo de este proyecto reside en el procesamiento de la señal y no en la evolución de los dispositivos dedicados a la audición. Por ello, tan sólo se ha realizado una visión general de los dispositivos dedicados a la mejora de la audición.

Capítulo 3

Propuestas de procesamiento no lineal de la señal de voz

3.1 Introducción

En este capítulo se explican los conceptos fundamentales teóricos de las señales de voz, así como el procedimiento que es necesario llevar a cabo para procesar de forma digital una señal analógica como es la voz. Seguidamente, se desarrollan de forma teórica los fundamentos básicos en los que se basan cada uno de los módulos de este proyecto.

3.2 Introducción al procesamiento de la señal de VOZ

Para la comprensión de los procedimientos de los diferentes módulos detallados en este proyecto, es necesario un breve resumen teórico del procesamiento de la señal de voz. Para ello, se realiza una pequeña descripción de las características fundamentales de las señales de voz.

La voz como cualquier sonido se puede representar como una curva ondulante y por tanto, se le pueden aplicar las mismas magnitudes y unidades de medida que a cualquier onda como ya se comentó en 2.2.2 Las características físicas del sonido.

La señal de voz es una señal continua y se puede definir como una onda armónica unidimensional, es decir, una onda generada por un oscilador armónico que se propaga a lo largo de una línea, como una cuerda con tensión horizontal que se sacude regular y verticalmente como se muestra en la siguiente imagen. Pero en este proyecto se realiza un breve resumen del comportamiento de las ondas en general, sin detallar los aspectos mecánicos.

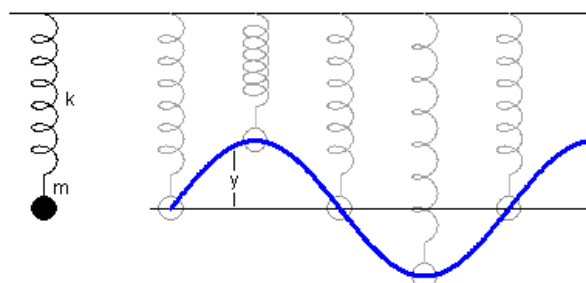


Figura 41. Onda formada por oscilador armónico.

Tal y como se ha comentado anteriormente, la señal de voz se define con las mismas propiedades que cualquier otra onda en general. Por lo que, a continuación, se describe la ecuación de una onda unidimensional para la definición de los parámetros característicos:

$$y = A \cdot \cos(\omega \cdot t \pm k \cdot x + \varphi_0)$$

Donde:

- y : es la función de la señal que determina el valor de la señal en un punto (x) y en un instante de tiempo (t)
- A : es la amplitud o valor máximo de la onda
- ω : es la frecuencia angular (rad/s) $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$
- k : es el número de ondas (rad/m) $k = 2\pi/\lambda$, y se cumple: $v = \lambda \cdot f = \omega/k$
- $(\omega \cdot t \pm k \cdot x + \varphi_0)$: se llama fase (rad) y depende del punto(x) y del instante(t)
- φ_0 : es la fase inicial y su valor determina el valor de y en $x=0$ cuando $t=0$

A partir de la ecuación anterior, es fácil determinar algunas características principales de las ondas como:

- Longitud de onda: es la distancia entre dos puntos consecutivos con la misma fase.
- Velocidad de propagación (o de fase) (v): es el desplazamiento efectuado por la onda en la unidad de tiempo.

- Período (T): es el tiempo que tarda una onda en volver a reproducirse. La inversa del período es la frecuencia ($f = 1/T$).
- Amplitud (A): es la máxima intensidad de la magnitud de la señal.

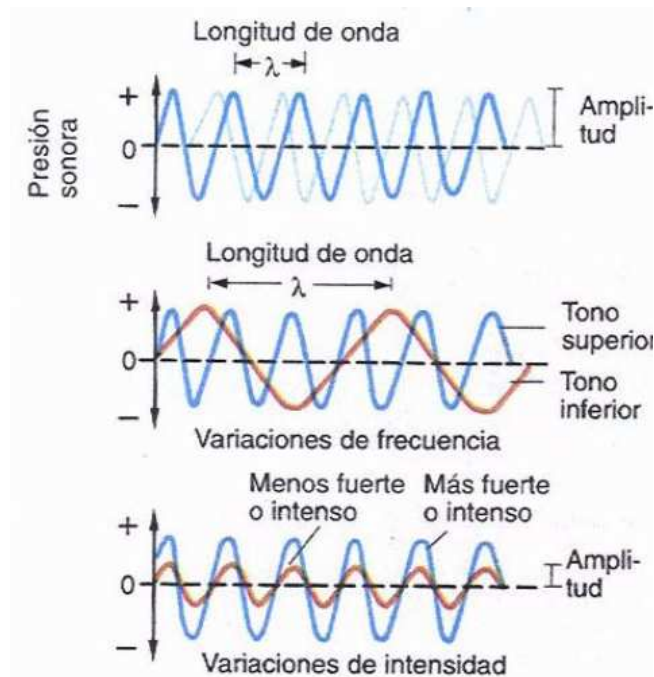


Figura 42. Características principales de una onda.

Como ya se ha comentado anteriormente, en este proyecto se desarrollan varios métodos que se basan en la modificación de estas características, para obtener una señal que sea más fácilmente escuchada por las personas objetivo.

Cada una de las características anteriormente mencionadas son fácilmente identificables para la definición del comportamiento de una onda propagante. La definición de estas características en una onda compleja era un poco más complicado hasta que Fourier demostró en 1822, que cualquier onda compleja periódica se puede expresar como una combinación o superposición de ondas armónicas simples, como se puede ver en la figura [29] .

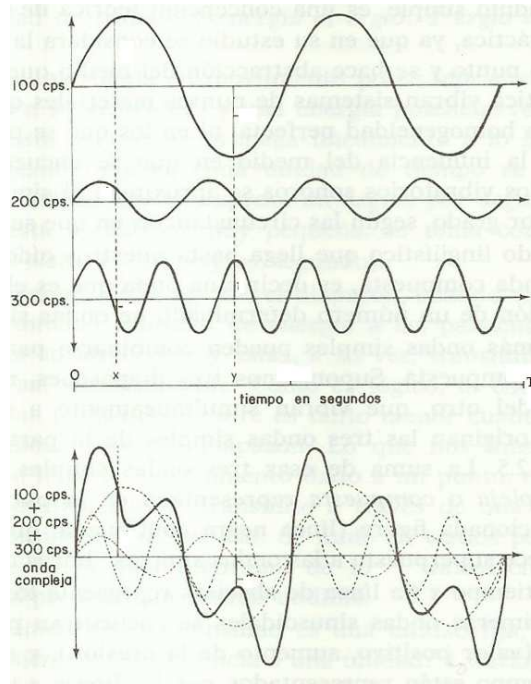


Figura 43. Formación de una onda compleja a partir de ondas armónicas simples.

Una vez que se han definido las principales características de las ondas, se comentan los diferentes dominios en los que se pueden realizar los estudios de las señales para posteriormente procesarlas. Para el análisis de cualquier señal se puede realizar un estudio en el dominio temporal y en el dominio de la frecuencia. Si se realiza un estudio en el dominio temporal, se puede obtener información sobre la energía de la señal, la potencia, la tasa de cruces por cero, la autocorrelación, etc.

La energía de una señal $x(t)$ periódica se puede obtener a partir de la siguiente ecuación:

$$E\{x(t)\} = |x(t)|^2$$

La tasa de cruces por cero de una señal discreta $x[n]$ indica el número de veces que la señal corta el eje cartesiano de abscisas, es decir, el número de veces que la señal cambia de signo. A partir de los valores de energía de una señal y de su tasa de cruces por cero, se puede identificar si una señal es sorda o sonora. Las señales sordas, al ser aleatorias se caracterizan por tener un valor de tasa de cruces por cero alto y un valor de energía no muy elevado, al contrario que las señales sonoras.

$$Tcc[m] = \frac{1}{N} \sum_n \frac{1}{2} |\text{sgn}(x[n]) - \text{sgn}(x[n-1])| w(m-n)$$

Donde :

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1, & x \geq 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$$

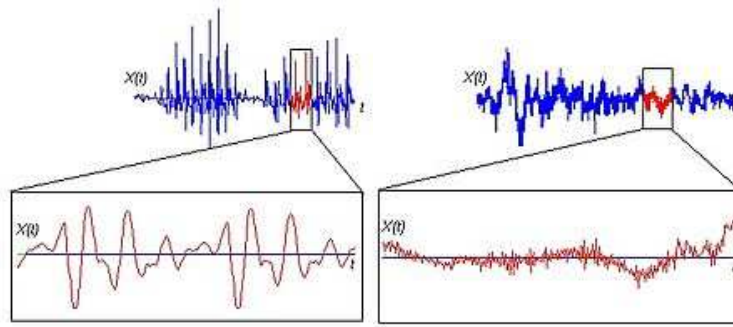


Figura 44 y 45. Representación de una señal sonora y sorda respectivamente.

La función de autocorrelación en este caso de una señal real, mide el parecido de una señal consigo misma en función de una variable de deslazamiento τ . Una de las funcionalidades que tiene el cálculo de la función de autocorrelación es la detección del pitch o frecuencia fundamental, acentuando los máximos temporales. Matemáticamente se puede expresar en continua y discreta como:

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot x(t - \tau) d\tau$$

$$R(n) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-|m|} x(n) \cdot x(n + |m|) \quad |m| = 0, \dots, N - 1$$

Debido a que la señal de voz es una señal continua, para el procesado de la señal es necesario convertirla en una señal discreta. Para ello, se debe muestrear la señal eligiendo de forma adecuada la tasa de muestreo para que posteriormente la señal discreta pueda identificarse con una única señal analógica.



Figura 46. Conversión analógica/digital/analógica de una señal.

Para que el procesado de la señal sea óptimo, es necesario prestar especial interés a la tasa de muestreo. La elección de la tasa de muestreo debe cumplir el Teorema que desarrolló Nyquist, que afirmaba que cualquier señal analógica puede ser reconstruida sin error, si las muestras son tomadas en iguales intervalos de tiempo y siendo la tasa de muestreo igual o mayor al doble del ancho de banda de la señal analógica.

$$f_m \geq 2 \cdot BW_{analógica}$$

Dado que la señal de voz no es estacionaria, es decir, sus características varían con el tiempo, el procesamiento de la señal debe realizarse utilizando ventanas para aislar las partes de la señal con características invariantes en ese periodo de tiempo. El tipo de ventana que se utiliza y su longitud tienen una gran importancia, ya que deben cumplir un compromiso entre la resolución temporal y frecuencial. De este compromiso se habla más adelante en el apartado 4.4.2. Descripción de cómo se ha desarrollado cada módulo solución.

El enventanado de una señal consiste en la selección de un segmento de la misma y para ello se multiplica la señal $x(n)$ por una ventana $w(n)$ con duración N , que debe tener las siguientes propiedades:

- suficientemente corta para que las propiedades de la señal de voz no varíen durante ese segmento de la misma.
- suficientemente larga para encontrar la información necesaria para estimar los parámetros deseados.

Las prestaciones de las distintas ventanas dependen de las siguientes características:

- Longitud de la ventana (o anchura del lóbulo principal, en el dominio de la frecuencia).
- Forma de la ventana (o amplitud relativa de los lóbulos secundarios respecto al principal, en frecuencia).

Matemáticamente, el enventanado se puede explicar de la siguiente forma:

$$x(n_{\text{enventanado}}) = x(n) \cdot w(n - k)$$

$$\text{siendo } k \in [n_{\text{enventanado}} - N + 1, n_{\text{enventanado}}]$$

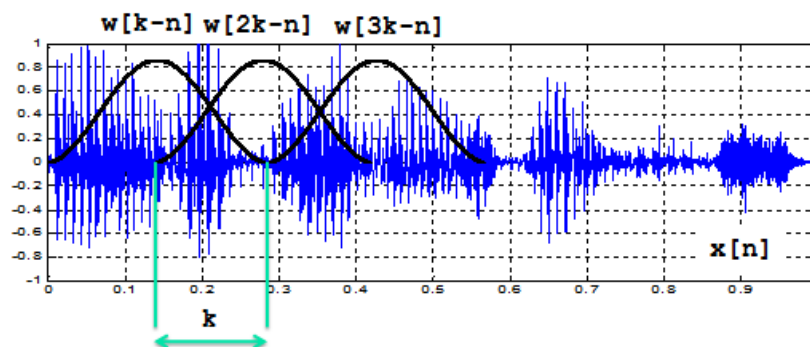


Figura 47. Enventanado de una señal utilizando una hanning de tamaño N .

La elección del tipo de ventana es importante, por lo que seguidamente se comentan las principales ventanas con sus respectivas representaciones en el dominio temporal y frecuencial.

- Ventana rectangular.

$$w(n) = 1 \text{ donde } 0 \leq n \leq N - 1$$

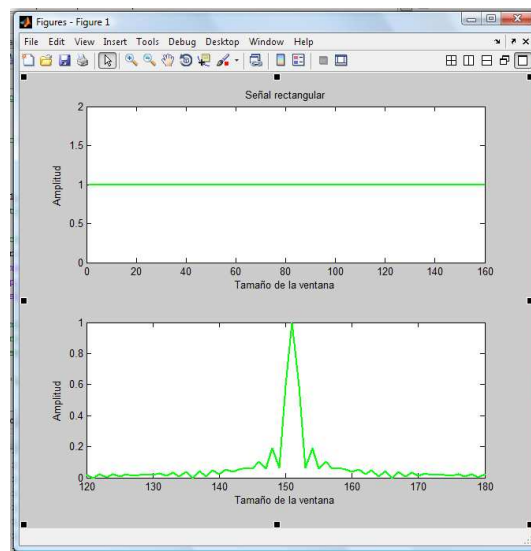


Figura 48. Representación de la ventana rectangular.

- Ventana triangular o bartlett.

$$w(n) = \frac{N}{2} - \left| n - \frac{N-1}{2} \right| \text{ donde } 0 \leq n \leq N-1$$

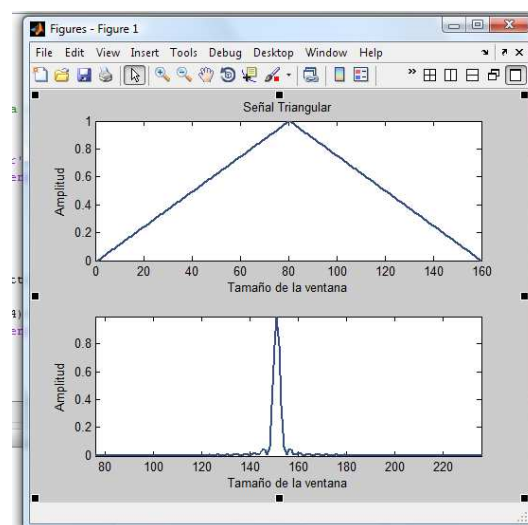


Figura 49. Representación de la ventana triangular.

- Ventana blackman.

$$w(n) = a_0 - a_1 \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + a_2 \cdot \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right)$$

siendo $a_0=0,42$, $a_1=0,5$, $a_2=0,08$

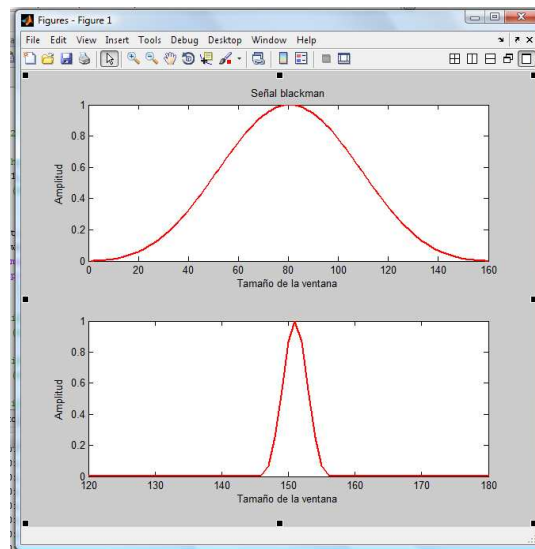


Figura 50. Representación de la ventana blackman.

- Ventana hamming.

$$w(n) = a_0 - a_1 \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \text{ siendo } a_0 = 0,53836, a_1 = 0,4664$$

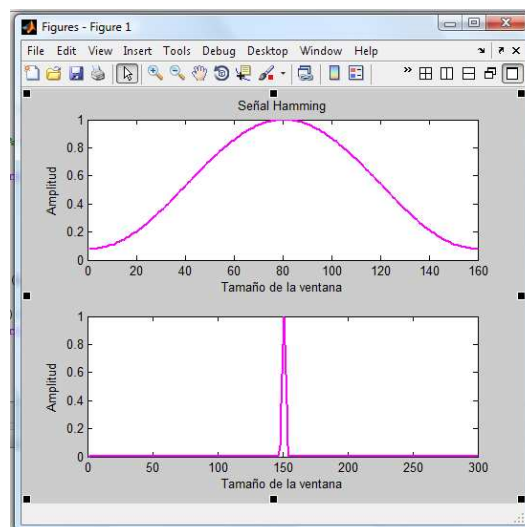


Figura 51. Representación de la ventana hamming.

- Ventana kaiser.

$$w_k = \begin{cases} \frac{I_0(\pi\alpha\sqrt{1-(2k/n-1)^2})}{I_0(\pi\alpha)} & \text{si } 0 \leq k \leq n \\ 0 & \text{resto} \end{cases}$$

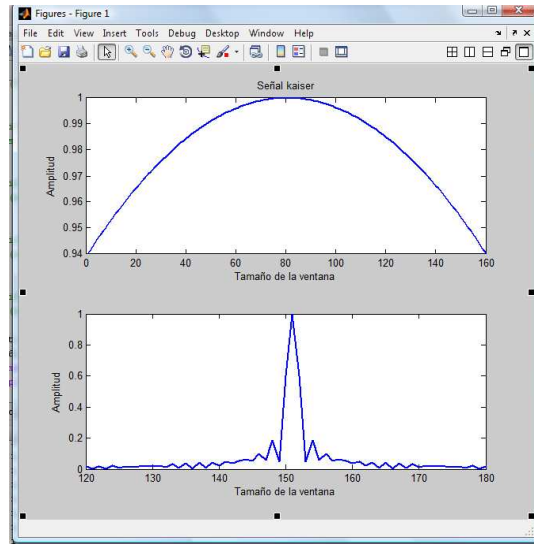


Figura 52. Representación de la ventana kaiser.

Si el lóbulo principal de la ventana en el dominio de la frecuencia es ancho se produce un suavizado espectral, lo que implica una menor resolución de detalles en el dominio de la frecuencia.

En cambio, si la amplitud de los lóbulos secundarios es grande, se acentuarán las pérdidas puesto que unas frecuencias interactúan con otras provocando errores en las amplitudes.

Para observar las características de la señal en el dominio de la frecuencia, es necesario utilizar la Transformada de Fourier:

$$X(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi wt} dt \quad \text{Transformada Continua de Fourier}$$

$$X(N) = \sum_{-\infty}^{+\infty} x(n) \cdot e^{-j2\pi fn} \quad \text{Transformada Discreta de Fourier}$$

Para analizar las características de la señal en el dominio del tiempo a partir del espectro de la señal se consigue con la Transformada Inversa de Fourier.

$$X(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(w) \cdot e^{-j2\pi wt} dw \quad \text{Transformada Continua Inversa de Fourier}$$

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(n) e^{-j2\pi kn/N}$$

Transformada Discreta Inversa de Fourier

$k=0\dots N-1$;

En la señal de voz pueden distinguirse dos contribuciones: la del tracto vocal, responsable de la estructura de formantes, y la de la excitación, que proporciona la estructura armónica en el caso de ser una señal sonora. La primera se caracteriza por tener una variación lenta a lo largo del tiempo, mientras que la segunda es más rápida.

Por tanto, si la longitud de la ventana es demasiado corta no se puede observar la estructura armónica de la señal porque la resolución en frecuencia es muy pequeña. En cambio, la resolución temporal es elevada y se puede detectar eventos de poca duración al analizar la Transformada de Fourier. Por el contrario, cuando la longitud de la ventana es grande se obtiene una mayor resolución en frecuencia y se puede observar la estructura armónica (cuando exista), pero la resolución temporal es pequeña.

Una vez que se han comentado brevemente los anteriores aspectos generales del procesamiento de las señales de voz, se comentan las ventajas del procesamiento no lineal de las señales de voz en el siguiente apartado.

3.3 Procesado de la señal.

Tal y como se comentó en el apartado 2.3.3 Descripción y delimitación de las hipoacusias y presbiacusias, las disfunciones auditivas que no afectan por igual a todo el rango de frecuencias no se pueden tratar con un simple procesamiento lineal para obtener resultados óptimos. Es decir, cualquier procesamiento de señal que intente solucionar los principales problemas de audición tratando de la misma forma a todo el espectro de frecuencias, no conseguirá los mejores resultados.

Debido a que este proyecto se centra en los estudios de la presbiacusia e hipoacusia, los métodos resultantes que se proponen son mayoritariamente no lineales. En el capítulo 2.4 Audífonos actuales en el mercado y estudios de problemas de audición, se comentaron diferentes procedimientos de procesamiento de la señal de voz.

Para comprender la ineficiencia del procesamiento lineal más común como método solución de la hipoacusia y presbiacusia, se explica a modo de ejemplo la amplificación de todas las frecuencias.

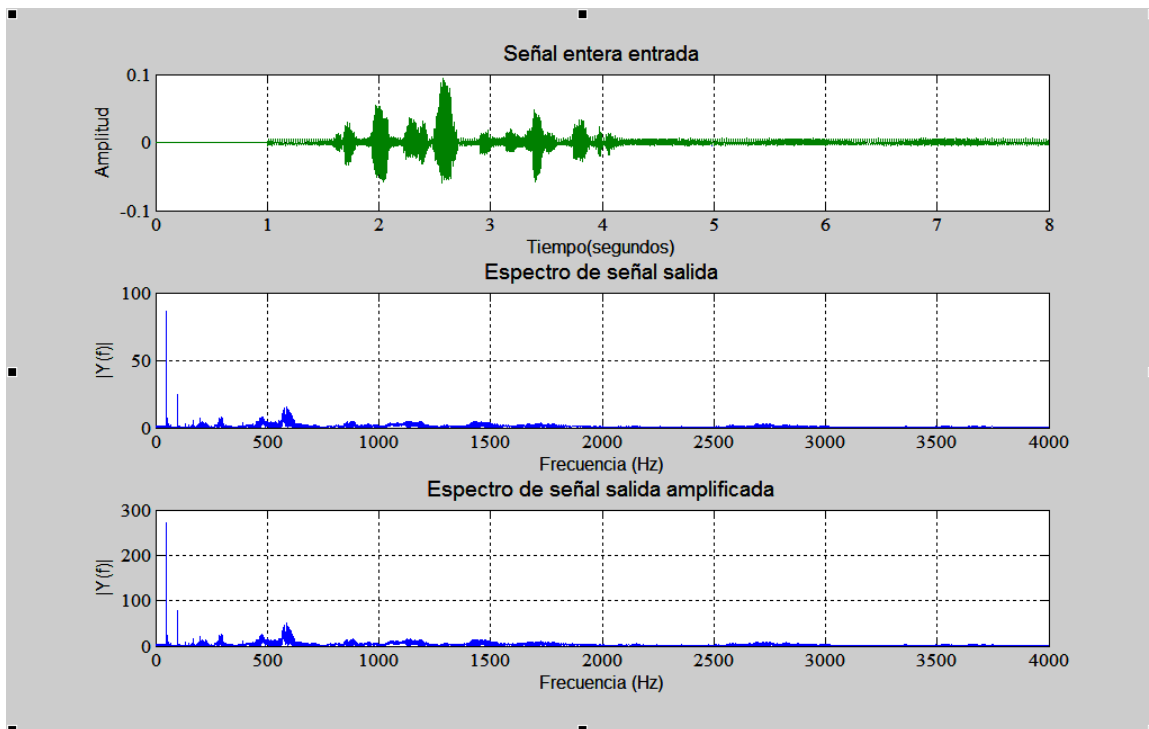


Figura 53. Amplificación de todo el espectro.

En el anterior gráfico, se puede observar como todas las frecuencias aumentan el valor de su amplitud ($|Y(f)|$). Al aumentar la amplitud de todo el espectro de frecuencias, las personas con presbiacusia o hipoacusia son capaces de escuchar mejor las frecuencias afectadas en dicha deficiencia. En cambio, la amplitud del resto de frecuencias que la persona oía bien, son amplificadas de forma innecesaria y a veces puede provocar molestias e incompreensión.

Además, unos de los principales inconvenientes que resultan son los ruidos molestos y amplificaciones de frecuencias no necesarias.

Los métodos que procesan de la misma forma todo el espectro mejoran la audición de personas con problemas de audición, pero no de forma eficiente. Por lo que, a continuación, se resumen algunas de las principales líneas de investigación que existen en el momento, que se basan en el procesado lineal y no lineal de la señal de voz [30].

3.3.1 Estudios de procesado lineal y no lineal

En primer lugar, se explican los estudios referentes a la trasposición de frecuencias. Estas líneas de investigación se centran en identificar si la señal se encuentra por encima o por debajo de una frecuencia concreta. Si la señal se encuentra por encima de la frecuencia definida como umbral, se realiza una trasposición de frecuencias.

La trasposición puede basarse simplemente en el desplazamiento de las frecuencias, cambiando las frecuencias de la señal modificada como se ve en la Figura 55 ó entrelazando las señales de las frecuencias bajas con la señal de las frecuencias altas como en la Figura 56.

La superposición de información de alta y baja frecuencia que se produce en el entrelazamiento de señales, da como resultado el enmascaramiento de la información de frecuencias bajas por la de las frecuencias altas.

Cuando se aplican estas técnicas, el objetivo principal es proporcionar audibilidad en regiones de frecuencias en las que se encuentran las pérdidas de audición. Las personas que se benefician de la trasposición de frecuencias altas son aquellas que no les favorece la amplificación convencional.

Los problemas de estos estudios son la dificultad de la definición de la frecuencia umbral o corte y las distorsiones e inteligibilidad que provocan el entrelazamiento de las frecuencias bajas y las altas transposicionadas. Casi todos los métodos que conllevan un desplazamiento frecuencial implican distorsión, pero normalmente cuanto mayor es el desplazamiento mayor es la distorsión.

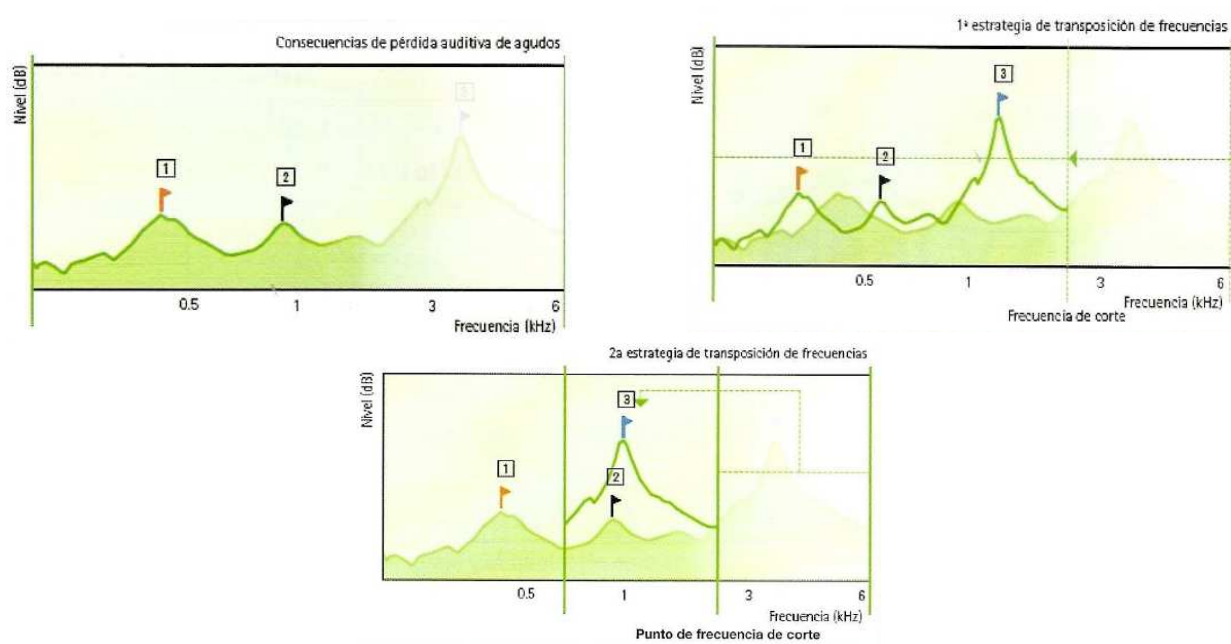


Figura 54, 55 y 56. Incapacidad de audición de determinadas frecuencias. Transposición de frecuencias cambiando la señal. Transposición de frecuencias entrelazando las señales.

En segundo lugar, se encuentran las investigaciones referentes a la compresión de la señal de un rango de frecuencias determinadas. Los estudios relacionados explican la posibilidad de comprimir una gama de frecuencias altas a partir de una frecuencia corte, en un rango más reducido. De esta forma, se realiza un desplazamiento de la señal comprimida a una zona de frecuencias sin problemas de audición.

La señal hasta la frecuencia de corte permanece intacta pero a partir de la frecuencia de corte, se comprime la señal en una zona adyacente con mejor audición residual sin interferir en la audición de la señal en las frecuencias bajas.

Las ventajas de estos estudios incluyen una mejora en la audición de agudos en las señales de voz, evitando parte de los problemas de los estudios anteriores. A pesar de

originar una considerable mejora en la audición, la definición de la frecuencia de corte y las señales inteligibles siguen siendo una dificultad en el desarrollo de los estudios.

Braida después de todos los estudios realizados, afirma en sus publicaciones que la compresión sustancial del espectro tiende a crear patrones de sonidos que difieren drásticamente del habla normal y para la obtención de resultados óptimos es necesario un curso intensivo, para que los usuarios estén capacitados para el uso apropiado de audífonos basados en esta técnica [33].

Posteriormente, se desarrollaron otros estudios referentes a la compresión no lineal del espectro de frecuencias. Dichos estudios se basan en realizar una compresión de factor variable, es decir, el factor de compresión va aumentando de forma progresiva en función de las frecuencias más altas.

En estas líneas de investigación, la señal de las frecuencias inferiores a la frecuencia de corte permanece intacta, mientras que la señal de las frecuencias superiores se comprime de forma variable como se puede observar en la Figura 57.

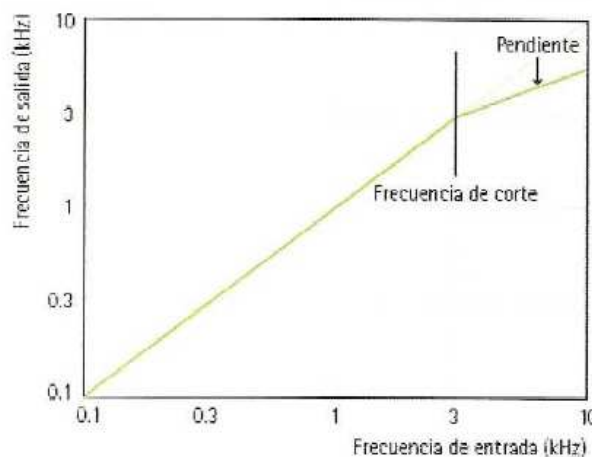


Figura 57. Factor de compresión de las regiones espectrales.

Los efectos que producen los estudios referidos a la compresión de un rango de frecuencias determinado, se pueden ver en la Figura 58. Estos métodos causan mejoras en la calidad de la señal reduciendo los chasquidos y distorsiones en la señal.

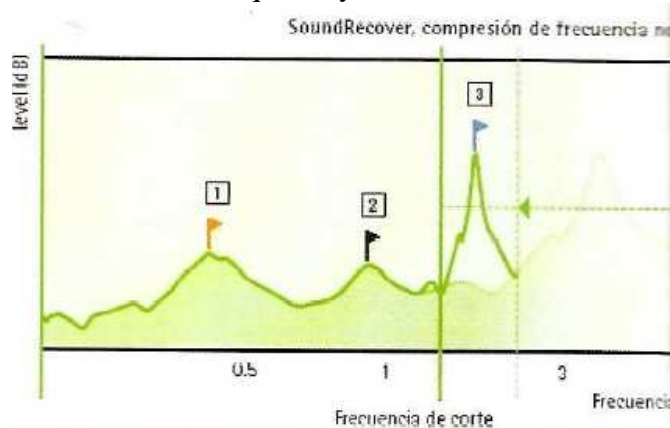


Figura 58. Compresión no lineal de un rango de frecuencias.

En tercer lugar, se realizan estudios basados en la búsqueda de la frecuencia fundamental o pitch, de la que se habla más en detalle en el siguiente apartado y la posterior compresión de la envolvente del espectro.

A partir de la detección de la frecuencia fundamental surgen dos estudios importantes, el desplazamiento del pitch (pitch shifting) y el escalado del pitch (pitch scaling)[31][32].

El primero de ellos consiste en el desplazamiento del pitch una cantidad determinada, que causa las distorsiones propias de cualquier desplazamiento en frecuencia. Este procedimiento se basa en un desplazamiento en el dominio de la frecuencia que es equivalente a la multiplicación por una exponencial compleja en el dominio del tiempo.

$$x(t) \cdot e^{j\omega_0 t} \Leftrightarrow X(j\omega - j\omega_0)$$

El desplazamiento en frecuencia provoca la aparición de sonidos metálicos que no favorecen en absoluto al objetivo del proyecto.

En cambio, el segundo consiste en un escalado en el dominio temporal más un remuestreo posterior que implica sonidos antinaturales en la reproducción de la señal de voz [32]. El escalado por una constante a en el dominio temporal equivale en el dominio frecuencial:

$$x(at) = \frac{1}{|a|} \cdot X\left(\frac{j\omega}{a}\right)$$

Este método tiene algunos problemas, porque al escalar se modifica la longitud original y es necesario realizar un remuestreo que provoca repeticiones de tramos de la señal y solapamientos que causan problemas en la comprensión.

En cuarto lugar, se pueden destacar los estudios que identifican el tipo de fonemas con el procesado posterior de las señales. Las conclusiones finales de estos estudios, se apoyan en que es necesaria la identificación de cada tipo de fonema, para poder utilizar el algoritmo correspondiente y así obtener resultados óptimos. Por lo tanto, un conocimiento fonético profundo puede mejorar la calidad de la síntesis de la señal de voz.

Estas conclusiones despiertan grandes discusiones, debido a que el análisis tan exhaustivo de la señal de voz conlleva gran cantidad de inconvenientes y retardos, que son poco apropiados para las aplicaciones en tiempo real. Además del análisis de los fonemas, también existen diversos estudios que investigan las mejoras de audición dependiendo de la entonación y pronunciación de cada fonema.

La principal dificultad que ofrecen estas investigaciones consiste en identificar los diferentes fonemas, debido a que la señal del habla es continua y no se pueden definir fácilmente los límites. Por esta razón, la segmentación de los sonidos en una secuencia acústica no es sencilla, porque no siempre un segmento corresponde con un único sonido vocálico o consonántico.

Según los estudios que mencionan McAulay y Quatery en sus publicaciones, los resultados obtenidos tras realizar la detección del pitch y la compresión de forma no-uniforme de la envolvente del espectro, son mejores para sonidos fricativos y africados (lowering processing) [34]. En cambio, para los sonidos semi-vocálicos y nasales se obtienen mejores resultados utilizando algoritmos basados en modelos sinusoidales adaptados a la correcta elección de la frecuencia fundamental del espectro y la posterior modificación de la profundidad entre el pico y el valle (sharpening processing). Para los sonidos plosivos, se ha demostrado que se obtienen casi idénticos resultados [35].

Estos métodos producen mejoras notables en la calidad de la señal de voz, aunque no se obtienen resultados óptimos en todos los casos, debido a la diversidad de patologías de las personas con deficiencias auditivas. Por este motivo, todas estas líneas de investigación siguen estando abiertas para solventar problemas de audición, aunque se han comercializado diferentes productos revolucionando el sector de las audioprótesis con algunos de estos métodos, como ya se comentó en el apartado 2.4.3 Soluciones del mercado.

A continuación, se explican más detalladamente las características principales de los cuatro métodos que se han desarrollado en este proyecto para mejorar los problemas de hipoacusia. En el capítulo 4.4.2.Descripción de cómo se ha desarrollado cada módulo solución, se comentan en profundidad las bases de cada uno de ellos.

3.3.2 Técnicas de los módulos elegidos

Tal y como se comenta anteriormente, los pilares básicos en los que se basa el proyecto son: la traslación, el escalado y la amplificación. Pero cada uno de éstos métodos se pueden implementar de diferentes formas como se explica a continuación.

3.3.2.1 Desplazamiento de la región deficiente en el espectro.

Este método se basa en la idea intuitiva de poder desplazar la región muerta de frecuencias a otra zona en la que el paciente no tiene ninguna deficiencia auditiva. Generalmente, este método necesita una delimitación muy clara de la región deficiente para poder desplazarla y de esta forma perder la mínima información en el procesado.

Este método se desarrolla como fase previa al método de traslación circular, por lo que no tiene las mismas prestaciones que el resto de los módulos implementados. Aunque se ha incluido en las pruebas de la aplicación, son notables las pérdidas de información en algunos casos.

En este método es necesario realizar unas pruebas como la audiometría para estimar la región muerta. En este caso, se desplaza la región muerta hacia frecuencias altas tal y como se muestra en la siguiente imagen:

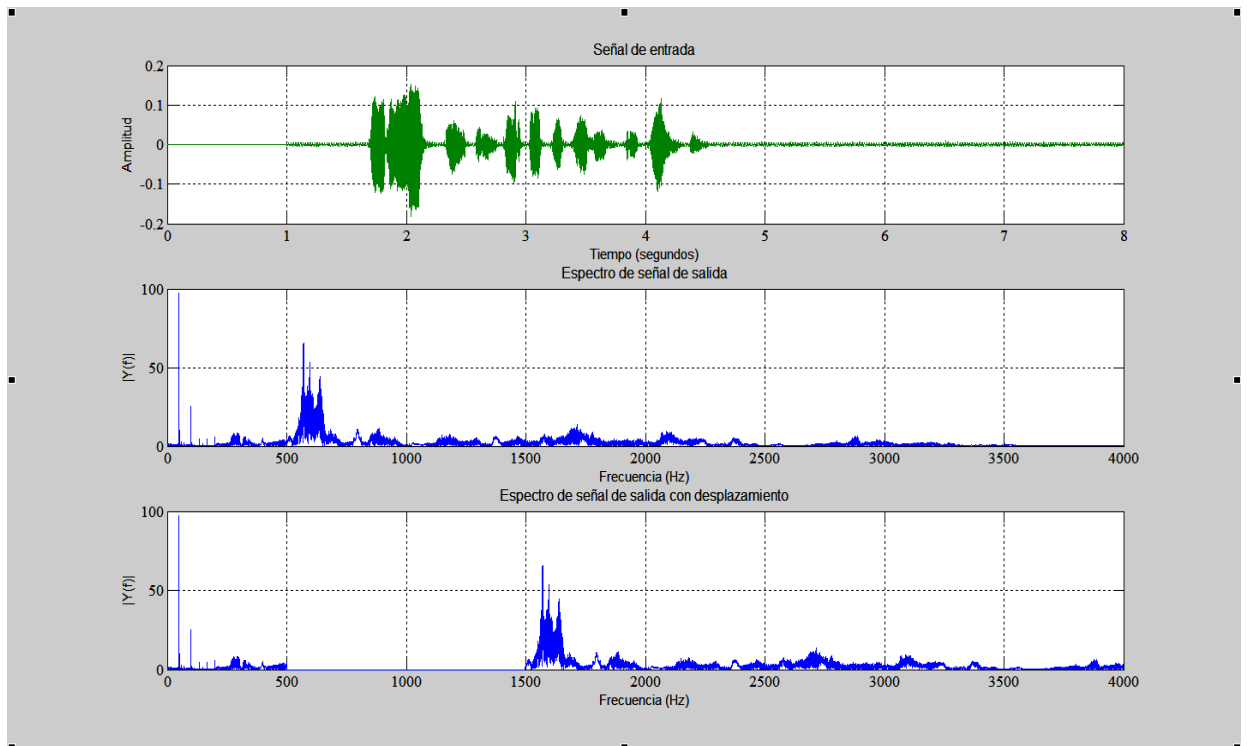


Figura 59. Señal original, espectro señal y espectro señal con región muerta desplazada (500Hz-1500Hz).

Este modelo se basa en el procesamiento lineal de la señal puesto que se desplaza toda la señal. La cantidad de desplazamiento viene definida por el tamaño de la región muerta, a mayor zona deficiente mayor es el desplazamiento.

En el apartado 4.4.2 Descripción de cómo se ha desarrollado cada módulo solución, se describe más concretamente la forma de implementación elegida para el desarrollo del desplazamiento de la región muerta.

Debido a las pérdidas de información de este módulo se decide implementar un método con traslación circular que se explica más adelante.

3.3.2.2 Búsqueda de la frecuencia fundamental (pitch).

Tal y como se comenta en el apartado anterior, la búsqueda de la frecuencia fundamental es el centro de muchos de los estudios que se realizan para el procesado de la señal de voz. Debido a ello, uno de los módulos que se desarrollan en este proyecto conlleva la búsqueda del pitch combinado con la traslación circular que se detalla más adelante.

La forma de onda de la señal de voz viene determinada por los armónicos, que son una serie de vibraciones que acompañan a una vibración primaria o fundamental del movimiento ondulatorio. Al producirse la vibración se obtiene un sonido compuesto por una serie de sonidos de diferentes frecuencias (armónicos).

La frecuencia fundamental o pitch informa sobre la velocidad a la que vibran las cuerdas vocales al producir un sonido, debido a la rápida apertura y cierre de las cuerdas vocales al expulsar el aire.

El pitch es un atributo de gran importancia pues sirve para ordenar de forma creciente los sonidos en una escala logarítmica. Por esta razón, seguidamente se describen diferentes métodos para la detección del pitch.

Debido a la gran importancia del pitch en las técnicas del procesado de la señal de voz, existen diferentes métodos de detección del Pitch según el dominio en el que se analiza la señal: tiempo, frecuencia o ambos [36].

- Dominio temporal.

El análisis se basa en la búsqueda de estructuras repetitivas a una velocidad semejante a la del pitch en intervalos cortos de tiempo y en la utilización de filtros para obtener los mínimos armónicos posibles de la frecuencia fundamental.

- Algunos métodos se basan en la localización de cambios abruptos a partir del parámetro de tasa de cruces por cero. Algunos estudios interpretan que el instante del cierre glótico provoca un cambio abrupto en la señal que se podría identificar como la frecuencia fundamental, por lo que no es del todo eficaz dicho método [37]. El principal inconveniente de este procedimiento consiste en el retardo introducido para la detección de los cambios abruptos y repetitivos y el prefiltrado necesario para atenuar los efectos del ruido en la señal.
- Otros métodos se basan en la función de autocorrelación para identificar valores promedios en el tiempo idénticos en un intervalo. Sin embargo, se ha demostrado la existencia de armónicos con mayor cantidad de energía que los máximos locales de los intervalos de tiempo que pueden dificultar la detección de éstos. En la figura siguiente se puede observar un ejemplo de ello, puesto que la frecuencia fundamental es 158,8Hz y el máximo absoluto se encuentra en 484,5Hz.

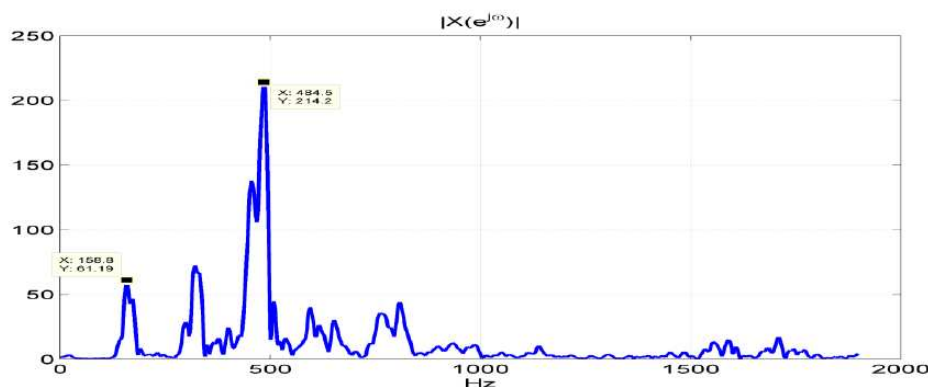


Figura 60. Ejemplo de armónicos con mayor energía que la frecuencia fundamental.

En el dominio temporal podemos destacar el algoritmo STCCF (Short Time Cross Correlation Function) y AMDF (Average Magnitude Difference Funtion).

STCCF es un algoritmo que utiliza ventanas rectangulares y se basa en el cálculo de la autocorrelación de dos ventanas consecutivas. Una vez que se ha obtenido el mayor valor de autocorrelación se identifica como frecuencia fundamental y se utiliza un umbral para identificar presencia/ausencia de sonido tal y como se muestra seguidamente en forma vectorial. Finalmente se realiza la media de los valores de las autocorrelaciones.

$$R(\tau) = \frac{x(\tau) \cdot x(\tau + 1)}{|x(\tau)| \cdot |x(\tau + 1)|} = \begin{cases} \leq \gamma, & \lambda = 0 \\ > \gamma, & \lambda = 1 \end{cases}$$

Siendo γ el umbral que detecta si un tramos es sonoro ($\lambda = 1$) o sordo ($\lambda = 0$).

AMDF es otro algoritmo que recoge muestras consecutivas de la señal para construir una señal estimada. Posteriormente, se realiza la autocorrelación de la señal original y la señal estimada y se calcula su diferencia. En este caso se buscan los valores mínimos, en vez de buscar los valores máximos para encontrar el pitch. Este método no es elegido como método resolución por la complejidad de la estimación de la señal, puesto que es necesario el estudio exhaustivo de algunos parámetros.

$$AMDF[m, \tau] = \sum_{n=m+\tau}^{m+N-1} |s[n]w[n-m] - s[n-\tau]w[n-m-\tau]|$$

- Dominio frecuencial.

El análisis se basa en enfatizar las características de los armónicos de las diferentes ventanas del espectro. Estos métodos de basan en la localización de picos en el espectro de la señal a partir de la Transformada de Fourier. Pero la alta varianza presente en los datos de alta frecuencia y la poca resolución en regiones de frecuencias bajas, afectan a la eficiencia de estos métodos.

Uno de los ejemplos de algoritmos de dominio frecuencial es el STFT (Short Time Fourier Transform), que realiza una búsqueda de una estructura armónica periódica en el espectro de la señal de voz. Con la Transformada de Fourier utilizando ventanas, se pueden localizar diferentes armónicos, pero sólo se conoce el comportamiento de la señal en ese intervalo de tiempo puesto que la localización depende del ancho elegido para la ventana. De ahí, que la elección del ancho de la ventana sea de gran importancia para la eficacia de este método. Si la elección del tamaño de la ventana no es la adecuada, no se pueden distinguir armónicos muy próximos si aparecen muy cerca unos de otros, ya que no es posible distinguir comportamientos distintos dentro de una misma amplitud de ventana.

Esta técnica es la elegida en el desarrollo de este método resolutivo, por la sencillez y buenos resultados que se obtienen en el procesado de la señal de voz. Tal y como se explica posteriormente en el apartado 4.4.2. Descripción de cómo se ha

desarrollado cada módulo solución, se ha combinado con otras técnicas para conseguir el resultado óptimo que se requiere.

- Dominio temporal y frecuencial.

Los métodos que utilizan una combinación de los análisis en el tiempo y en la frecuencia, se basan en el enventanado de la señal para evitar la contaminación espectral y etapas de preprocesamiento para localizar de máximos espectrales en el dominio de la frecuencia.

Un ejemplo es la utilización de la Transformada Wavelet que permite analizar la señal con resolución diferente a diferentes frecuencias. Se diseña para producir alta resolución en el tiempo y baja resolución en frecuencia para señales de alta frecuencia, y baja resolución en el tiempo y alta resolución en frecuencia para señales de baja frecuencia [38].

El análisis de las señales con la transformada wavelet es equivalente a un proceso de filtrado, donde se realiza una división de los coeficientes, obteniéndose los coeficientes de aproximación (A) y de detalle (D). Los de aproximación son los valores altos de la escala, correspondientes a las componentes de baja frecuencia de la señal, por lo tanto, están asociadas a la función de escalamiento que se determina con un filtro pasa bajo. Los de detalle son los valores bajos de la escala que corresponden con las componentes de alta frecuencia, y están asociadas a la función wavelet que se determina como un filtro pasa alto.

Este método tiene gran utilidad en ambientes poco silenciosos puesto que se puede eliminar el ruido. Pero es complicada la elección de la familia de wavelets para aplicar en la descomposición. A continuación, se muestra la descomposición en diferentes niveles.

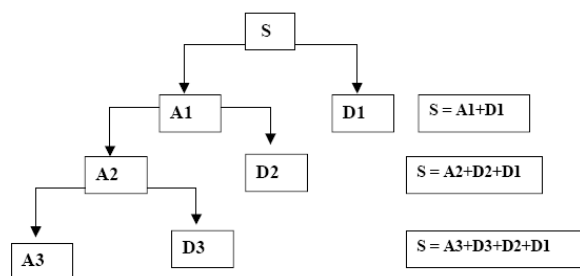


Figura 61. Descomposición wavelet en tres niveles.

Esta técnica no es la elegida, puesto que en este caso, el ambiente no es demasiado ruidoso y la elección de la familia de wavelets implica un estudio para obtener buenos resultados.

En el apartado 4.4.2 Descripción de cómo se ha desarrollado cada módulo solución, se describe el método elegido para la localización del pitch y la forma en que se ha desarrollado el módulo solución para este proyecto.

3.3.2.3 Delimitación de la región deficiente y amplificación de su espectro.

Este método se basa en la modificación de una de las características que se definen en el apartado 3.2 Introducción al procesado de la señal de voz. En este caso en concreto, se trata del aumento de la amplitud de la señal de voz.

A partir de algunas pruebas a los pacientes como las audiometrías, se puede percibir un rango de frecuencias en las que el individuo tiene problemas de audición. A este conjunto de frecuencias se le llama región deficiente o región muerta.

A modo de ejemplo, en la siguiente figura se muestra una definición gráfica de una estimación de una región muerta (1000Hz- 4000Hz).

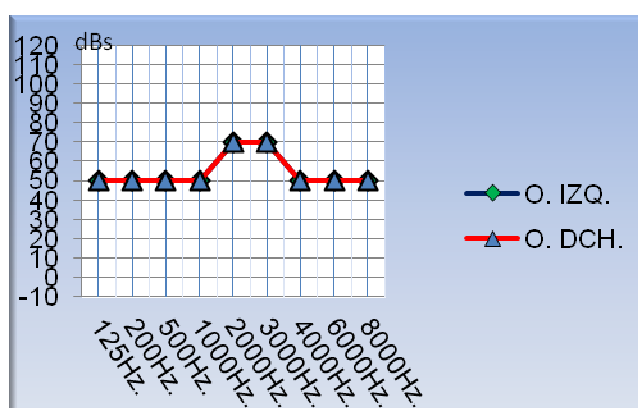


Figura 62. Representación gráfica de una región muerta (1000Hz-4000Hz).

Los primeros audífonos amplificaban todo el espectro de frecuencias provocando problemas indeseados como pitidos y amplificaciones innecesarias en algunas frecuencias, tal y como se muestra en el apartado 3.3 Procesado de la señal. Pero si sólo se realiza la amplificación en el conjunto de frecuencias con deficiencia auditiva, se evitan dichos problemas.

La amplificación de algunas frecuencias se obtiene mediante el aumento de la intensidad de dichas frecuencias, tal y como se muestra en la siguiente imagen:

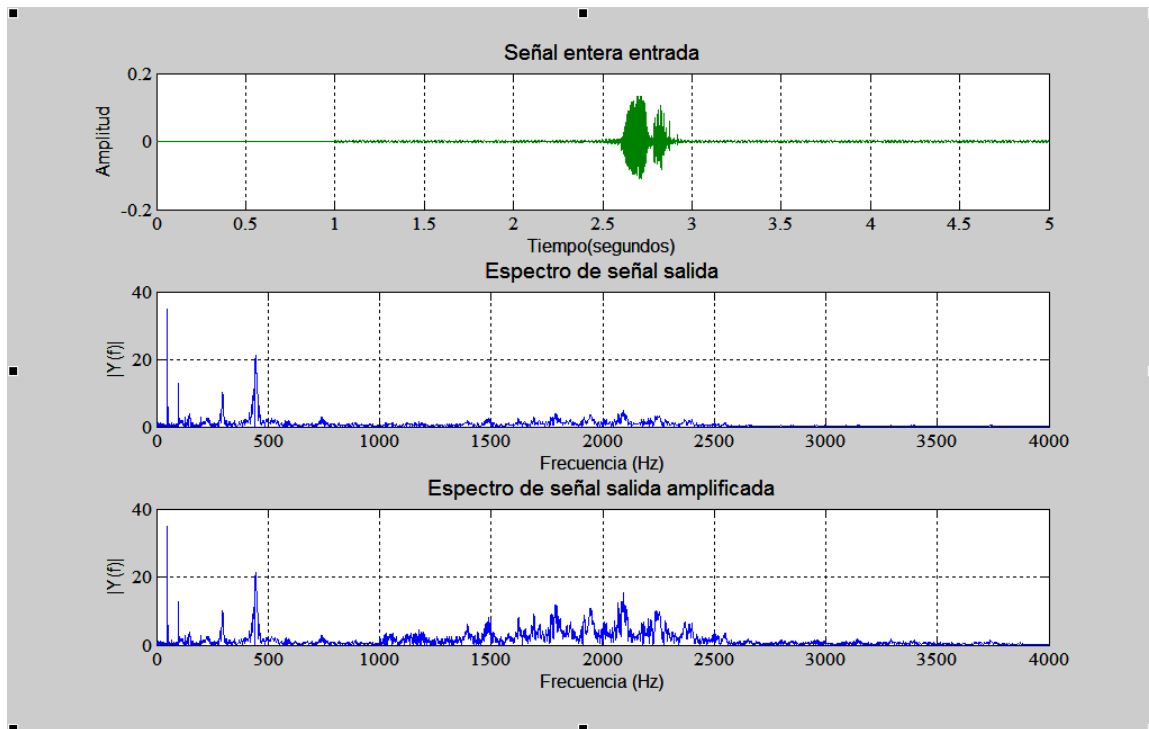


Figura 63. Señal original, espectro de señal, espectro señal con región muerta amplificada (1000Hz-4000Hz).

El aumento de la intensidad depende del valor en dBs de la amplificación y la ecuación que lo demuestra es la siguiente:

$$A = I_0 \cdot 10^{(dBs/10)}$$

Siendo I_0 la intensidad de la señal y dBs la cantidad que se quiere amplificar.

Dependiendo del grado de pérdida de audición de cada persona, la cantidad de amplificación es una variable que se define gracias a la audiometría previa.

En el apartado 4.4.2 Descripción de cómo se ha desarrollado cada módulo solución, se describe más exhaustivamente la forma de implementación elegida para el desarrollo de este módulo.

3.3.2.4 Estrechamiento/Ensanchamiento del espectro

Este método se basa en la infinidad de estudios que se han realizado sobre la hipoacusia, en los que se pone de manifiesto que los sonidos agudos son más

difíciles de escuchar por personas con dicha deficiencia. Por esta razón, el método se basa en el cambio de tono de la señal de voz [39].

Para obtener un cambio de tono en cualquier señal de voz existen varios métodos. Uno de ellos consiste en estrechar/ensanchar el tiempo de la señal de voz y posteriormente realizar un remuestreo en el dominio del tiempo. Al realizar la modificación de la duración de la señal origen no se modifica el tono, sólo la longitud de la señal. Para ello, se controla un parámetro que comprime/ extiende la duración de la señal, variando la velocidad de la señal de voz.

$$\text{tamaño}_{\text{modificado}} = \text{tamaño}_{\text{original}} \cdot \alpha$$

Siendo α el parámetro de compresión/estrechamiento.

Si el parámetro es mayor que 1 se considera que es un ensanchamiento de la longitud de la señal, mientras que si es menor que 1 se considera un estrechamiento.

Para la compresión/estrechamiento es necesario relacionar las muestras de la señal original con las de la señal de longitud modificada. Para ello, se necesita utilizar la función de autocorrelación discreta entre bloques adyacentes.

$$R(n) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-|m|} x(n) \cdot x(n + |m|) \quad |m| = 0, \dots, N - 1$$

El cambio de longitud se compensa con el re-muestreo posterior para el cambio del tono, que se basa en la asociación de cada muestra original con las muestras de la señal modificada y la modificación de la velocidad del muestreo. Los valores de las demás muestras que no están asociadas a ninguna muestra de la señal original se descartan. El principal inconveniente de esta alternativa es la aparición de repeticiones de tramos de la señal y solapamientos que causan problemas en la comprensión.

Otro de los métodos posibles que consigue mejores resultados consiste en realizar una compresión/ensanchamiento de la señal en el dominio del tiempo. Posteriormente, se realiza un escalado en el dominio de las frecuencias. Esto se consigue a través de la Transformada de Fourier junto a una modificación de escala con la simple multiplicación de un factor.

$$X(n) = \alpha \cdot \left[\frac{1}{N} \sum_{-\infty}^{+\infty} x(n) e^{-j2\pi kn/N} \right] \text{ siendo } k=0, \dots, N-1 \text{ y } \alpha \text{ el factor de escala}$$

A continuación, se realiza un re-muestreo en el dominio temporal para realizar la modificación de la velocidad de muestreo.

Uno de los inconvenientes de este último método, es la definición del factor de escala, puesto que es un valor variable y dependiente de cada patología.

Este último método es el elegido en el desarrollo de este proyecto por su facilidad de realizar el cambio del tono. En las siguientes figuras se pueden ver un ejemplo de estrechamiento y otro de ensanchamiento de la señal de voz:

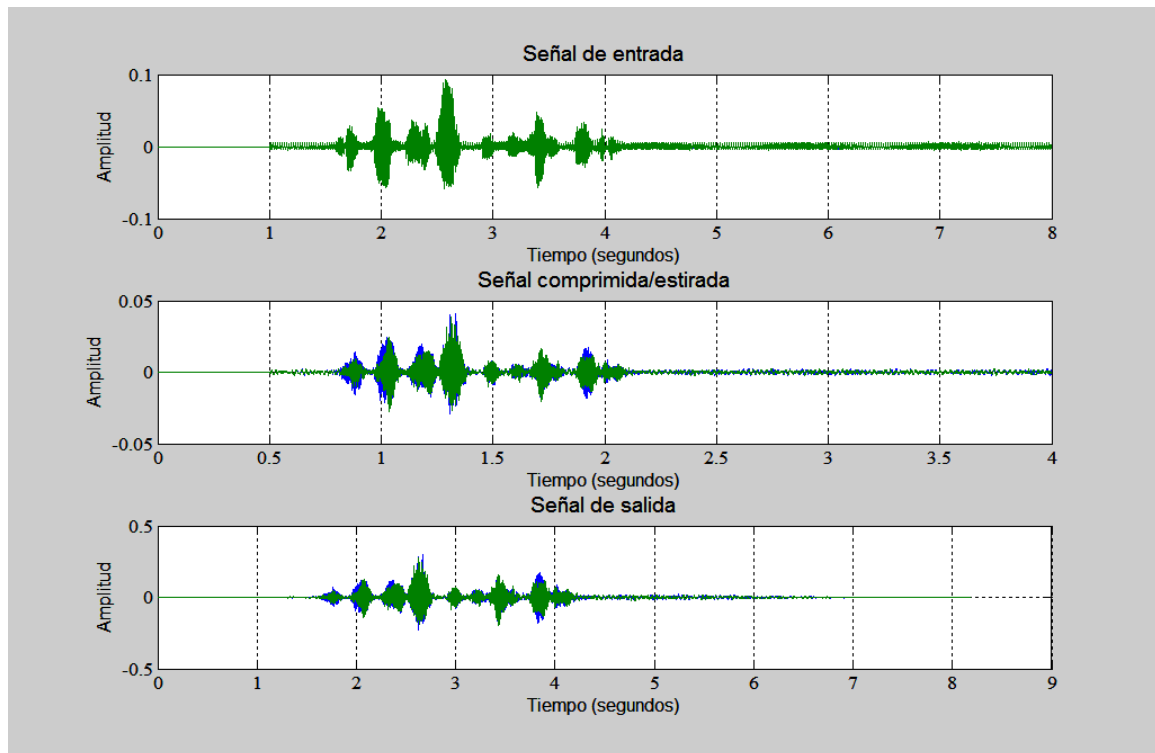


Figura 64a. Señal original, señal estrechada($FC=0,5$) en el tiempo y señal remuestreada de salida

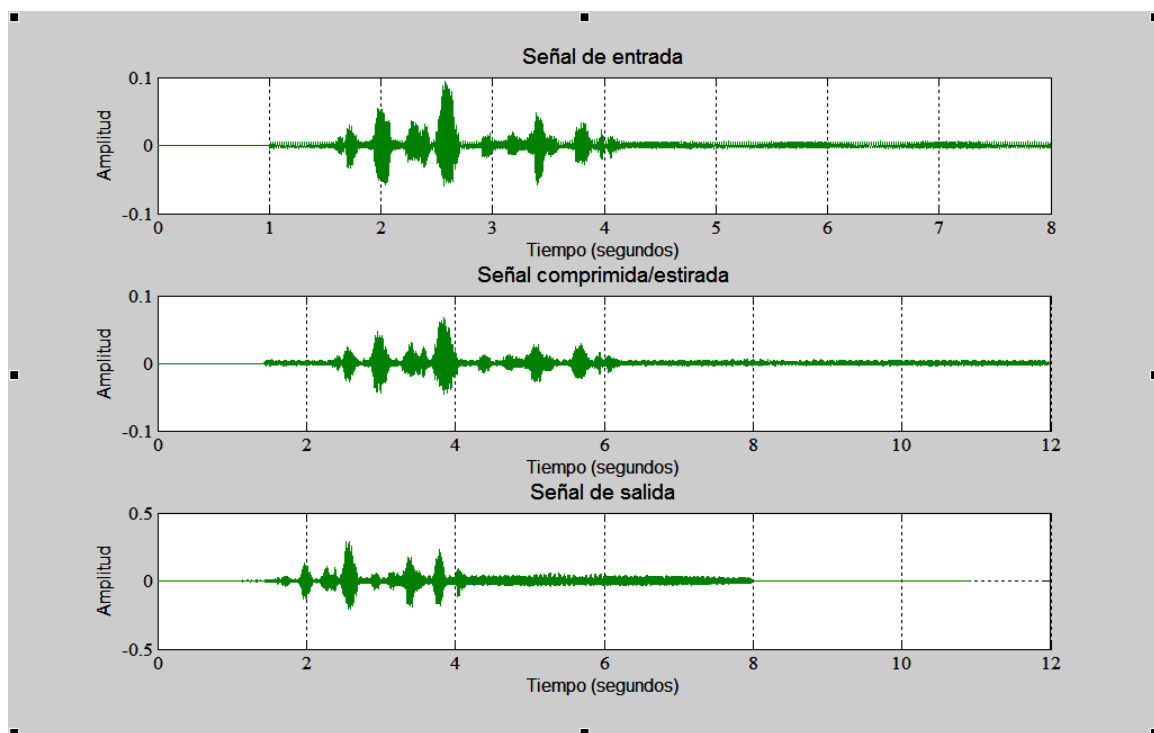


Figura 64b. Señal original, señal ensanchada ($FC=1,5$) en el tiempo y señal remuestreada de salida.

En la Figura 64a se pueden ver tres gráficas: la primera de ellas muestra señal de entrada en el dominio temporal, la segunda de ellas muestra la señal comprimida en el dominio temporal. Por último, en la tercera gráfica se observa la señal resultante en el dominio temporal después de haber escalado en el dominio frecuencial y re-muestrear en el dominio temporal.

En la Figura 64b se observan otras tres gráficas que son análogas a las anteriores pero con ensanchado temporal.

En el apartado 4.4.2 Descripción de cómo se ha desarrollado cada módulo solución, se describe más detalladamente la forma en la que se ha implementado el método del estrechamiento/ensanchamiento de la señal de voz.

Capítulo 4

Elección de las herramientas y medios utilizados

4.1 Introducción

En este capítulo se mencionan las herramientas hardware necesarias para el desarrollo del proyecto, así como las herramientas utilizadas. Además, se explican los motivos de la elección del tipo de software que se usa en el desarrollo de los módulos. Para terminar este capítulo, también se incluye una descripción de cada método desarrollado.

4.2 Descripción de las necesidades

A continuación, en esta fase se especifican las herramientas necesarias para el desarrollo del proyecto. En primer lugar, se requieren unas herramientas hardware que se especifican de forma detallada:

- Un ordenador con un procesador Intel Dual Core @2.20 GHz que sirve de plataforma para realizar la instalación de la herramienta software para la implementación del código.
- Un micrófono, que en este caso está integrado en el ordenador descrito anteriormente, para la grabación de voces que sirve en la realización de pruebas de audio.
- Unos altavoces, que también están incluidos en el ordenador, para la reproducción de las voces que ya han sido grabadas y procesadas de forma adecuada.
- Un par de auriculares, unos para que la muestra de la población objetivo pueda realizar las pruebas y expresar su opinión subjetiva sobre la calidad del audio y otros para la persona que controla el desarrollo de la prueba.

En segundo lugar, se necesita una herramienta software que se describe a continuación:

- Matlab, que se instala en el ordenador para la implementación del código.

En el apartado siguiente se detalla la causa de la elección del software elegido y las propiedades de éste.

En tercer lugar, es necesario especificar los estudios que se han realizado para el desarrollo del proyecto además de las herramientas utilizadas:

- Estudio del proyecto.
Se decide el verdadero objetivo del proyecto, los problemas que éste resolverá y la población muestral en la que se aplicará el proyecto.
- Estudio de las características teóricas del lenguaje de programación.
Se demuestra la elección del lenguaje de programación adecuado para el desarrollo del proyecto.
- Estudio sobre las características de las deficiencias auditivas y los conceptos básicos de la audición.

También, se deben realizar unas pruebas para la elección de la muestra de población. Con el objetivo de identificar a las personas con las disfunciones auditivas que son objeto del proyecto, se facilita a los oyentes un cuestionario. De esta forma se puede discernir entre las personas que son susceptibles de padecer problemas de hipoacusia y las personas que no se deben incluir en el análisis del proyecto.

En cuarto lugar, se describe el entorno en el que se realizan las pruebas:

- Las grabaciones de voz se realizan en una habitación en la que se elimina cualquier fuente de ruido que pueda perturbar la calidad de dicha grabación, es decir, se realizan grabaciones sin música de fondo, ni relojes, ni móviles...

- Las grabaciones se obtienen a una misma distancia del micrófono para evitar favorecer o perjudicar la calidad de la grabación.
- La muestra poblacional dispone de unos auriculares que aislarán al voluntario del resto de los ruidos, no obstante, se intenta que la escucha de las grabaciones de voz de prueba se realicen en una habitación silenciosa, sin otras conversaciones, ni música de fondo.

4.3 Elección del lenguaje de programación utilizado.

En este apartado se analizan las características de los diferentes lenguajes, para la posterior elección del lenguaje más adecuado para la implementación del código relacionado con el procesado y tratamiento de la señal de voz.

En primer lugar, se realiza un análisis previo clasificando los lenguajes en tres niveles: los de nivel bajo, los de nivel medio y los de nivel alto.

4.3.1 Estudio de los lenguajes de bajo nivel.

Los lenguajes de bajo nivel son aquellos que son totalmente dependientes de la máquina, es decir, que los programas que se realizan con este tipo de lenguajes no se pueden portar a otras máquinas, porque proporcionan muy poca abstracción del microprocesador de un ordenador. Al estar prácticamente diseñados a medida del hardware, aprovechan al máximo las características del mismo y es más fácil trasladarlo al lenguaje máquina [40].

El lenguaje de programación de primera generación, es el lenguaje de código máquina. Es el único lenguaje que un microprocesador entiende de forma nativa, porque consiste en la combinación de una serie de 0's y 1's que forman las órdenes que el hardware puede entender. Además el lenguaje máquina no puede ser escrito o leído usando un editor de texto, por lo que es más raro que lo use directamente una persona. Este lenguaje es más rápido que los lenguajes de alto nivel, pero los códigos fuente suelen ser de gran extensión [41].

El lenguaje de programación de segunda generación, es el lenguaje ensamblador. Se considera de segunda generación porque, aunque no es lenguaje nativo del microprocesador, un programador de lenguaje ensamblador debe entender la arquitectura del microprocesador (registros e instrucciones). Se puede considerar como un derivado del lenguaje máquina y está formado por abreviaturas de letras y números llamadas nemotécnicos.

4.3.2 Estudio de los lenguajes de nivel medio.

Se conoce como lenguajes de tercera generación a los lenguajes de medio nivel que se encuentran entre los lenguajes de alto nivel y los lenguajes de bajo nivel, como por ejemplo el lenguaje C.

Estos lenguajes son clasificados muchas veces de alto nivel, pero permiten ciertos manejos de bajo nivel, porque son precisos para ciertas aplicaciones como la creación de sistemas operativos, acceder a los registros del sistema, trabajar con direcciones de memoria, ya que permiten un manejo abstracto (independiente de la máquina, a diferencia del ensamblador), pero sin perder la eficiencia que tienen los lenguajes de bajo nivel [42].

4.3.3 Estudio de los lenguajes de alto nivel.

Los lenguajes de alto nivel son los que se encuentran más cerca del lenguaje natural que del lenguaje máquina, porque son independientes de la arquitectura del ordenador. Por lo que en principio, los programas de alto nivel son portables a otras máquinas sin problemas.

Otra de las cualidades de estos lenguajes es que el programador puede no prestar atención al funcionamiento interno de la máquina, puesto que tan sólo se necesita un traductor que entienda el código fuente como las características de la máquina.

Algunos de los lenguajes de alto nivel que podemos destacar por su eficacia son: Ada, ALGOL, Basic, C++, CT, Clipper, Cobol, Fortran, Java, Object Pascal, Pascal, Perl, PHP, PL/SQL, Python, Modula-2, Lenguajes funcionales o Haskell o Lisp, Matlab.

La clasificación de los lenguajes de alto nivel genera polémica, puesto que no todos están de acuerdo con las distinciones entre cuarta y quinta generación y es necesario advertir que algunos de los lenguajes anteriores no se pueden clasificar en una sola generación porque han tenido una evolución continua. Pero una clasificación a rasgos generales sería la siguiente.

Los lenguajes de cuarta generación son aquellos que son capaces de generar código por sí solos, son llamados RAD (aplicaciones de rápido desarrollo) porque se pueden realizar aplicaciones sin ser expertos en el lenguaje. Algunos están orientados a objetos, por lo que son capaces de reutilizar código. Algunos ejemplos son: Visual, ADA, Java, Natural Adabas...

Los lenguajes de quinta generación están orientados a la inteligencia artificial y están poco desarrollados como LISP.

4.3.4 Análisis de los lenguajes.

Para el análisis de las características de los diferentes niveles del lenguaje, se ha utilizado un cuadro comparativo para la posterior elección del lenguaje que más se adapta al objetivo del proyecto.

	Ventajas	Inconvenientes
Nivel Bajo	Mayor adaptación al equipo	Imposibilidad de escribir código independiente de la máquina
	Máxima velocidad con mínimo uso de memoria	Mayor dificultad en la programación
		Mayor dificultad en la comprensión de programas
Nivel Medio	Lenguajes flexibles	Requieren más tiempo en conseguir el ejecutable, porque cada vez compila todo el fichero
	Portabilidad	Poco legibles
	Gran velocidad y potencia	No suelen disponer de editores propios
Nivel Alto	Gran portabilidad	Reducción de velocidad al ceder el trabajo de bajo nivel a la máquina
	Facilidad de aprendizaje (escritura similar al lenguaje humano)	Requiere que la máquina tenga una determinada plataforma
	Código sencillo y comprensible	Aumenta la ocupación en memoria
	Modificaciones más fáciles	Tiempo de ejecución mayor
	Reducción del coste de los programas	No se aprovechan recursos internos de la máquina

Tabla 2. Tabla comparativa de los lenguajes.

4.3.5 Necesidades del lenguaje.

Para la elección del nivel del lenguaje adecuado, es necesario conocer las necesidades que tendrá el proyecto que satisfacer, por lo que a continuación se describirán las necesidades básicas del código a implementar:

- Facilidad en la programación. El desarrollo del código del programa a implementar no debe ser de gran complejidad para poder realizar el tratamiento y procesado de señales de audio.
- Velocidad. Las pruebas de audio requerirán una cierta velocidad para la calificación subjetiva de las personas con deficiencias auditivas, es decir, si entre una prueba de audio y otra prueba de audio se tardara demasiado tiempo no se podrían comparar sus calidades.
- Fiabilidad. El programa ha de ser fiable y deben estar previstos todos los casos que se puedan presentar durante su ejecución y los resultados deben ser correctos.

- Eficiencia. Se suele valorar en términos de tiempo de ejecución y consumo de memoria.
- Claridad. El programa debe estar escrito de forma que resulte legible especialmente en su lógica, es decir, debe ser posible que otro programador siga su lógica sin un esfuerzo excesivo.
- Simplicidad. El programa debe ser fácil de modificar para mejorar las posibles modificaciones posteriores.
- Modularidad. El programa se debe poder dividir en un conjunto de subtarear identificables, para diferenciar los diferentes métodos elegidos.
- Generalidad. El programa debe ser de alcance general para que las modificaciones posteriores sean fáciles de hacer y el campo de aplicación sea lo más variado posible. Los programas deben ser fácilmente modificables, porque según se realicen las pruebas se requerirán modificaciones del código que se adaptarán de forma más aproximada a las soluciones de los problemas planteados.
- Portabilidad. El programa debe ser ejecutable en cualquier otra máquina diferente a la máquina origen. Los programas deben de poder ser ejecutados con pocas o ningunas modificaciones en diferentes tipos de ordenadores. El grado de transportabilidad óptimo se consigue utilizando un compilador ajustado a normas estándar y renunciando a las extensiones de mejora introducidas por el fabricante.

La mayoría de las necesidades del proyecto pueden ser solucionadas por un lenguaje de nivel medio o de nivel alto. La portabilidad es una de las características más destacables del programa, porque no debe tener ninguna dependencia de la máquina, para la posterior portabilidad a otras plataformas. Por lo tanto, los lenguajes de bajo nivel quedan totalmente descartados.

En cuanto a la facilidad, la sencillez y la claridad de la programación, los lenguajes de bajo nivel son de gran dificultad de comprensión y programación. En cambio, los lenguajes de nivel medio son poco legibles aunque son más flexibles que los anteriores. Por lo que, seleccionaremos como una posible opción los lenguajes de alto nivel.

La elección de un lenguaje de nivel alto se basa en la facilidad a la hora de programar y realizar modificaciones, siempre y cuando el tiempo de ejecución no sea un inconveniente en el momento de realizar las pruebas de audio. La elección del nivel de programación se basa en un compromiso entre las facilidades de programación y la velocidad. Una de las propiedades de los lenguajes de alto nivel es la gran modularidad que ofrecen a los programas. Por estos motivos, la elección de un lenguaje de alto nivel es la opción más óptima. Más adelante se estudian las características de algunos lenguajes de alto nivel, para la elección del lenguaje en concreto de la programación del código del proyecto.

4.3.6 Descripción de posibles lenguajes.

En el apartado anterior, se decidió que los lenguajes de alto nivel son los que mejor se adaptan a las necesidades del proyecto. A la hora de decidir el tipo de lenguaje para la implementación del código, es necesario prestar atención a diferentes aspectos:

A continuación, se describe de forma bastante breve las principales ventajas e inconvenientes de algunos lenguajes de alto nivel para decidir el lenguaje que se utilizará en la implementación del código [43].

- Fortran:

Sus ventajas e inconvenientes se muestran en la siguiente tabla:

Ventajas	Inconvenientes
Aplicación numérica y científica	No portable
Lenguaje simple	No existen clases ni estructuras
Lenguaje de propósito general	No se puede realizar reserva dinámica de memoria
Muy potente y versátil	Lenguaje primitivo para estructuras complejas Sintaxis arcaica
Gran cantidad de rutinas y bibliotecas básicas	

Tabla 3. Ventajas e inconvenientes de Fortran.

- Pascal:

A continuación, se muestran sus ventajas e inconvenientes.

Ventajas	Inconvenientes
Facilidad de aprendizaje	Menos portable que otros lenguajes
Lenguaje de propósito general	En principio, no orientado a objetos
Programación modular	Obsoleto
Lenguaje estructurado y que soporta recursividad	Lenguaje para aprender a programar

Tabla 4. Ventajas e inconvenientes de Pascal.

- Python:

Sus ventajas e inconvenientes se muestran en la tabla comparativa:

Ventajas	Inconvenientes
Portabilidad	Lentitud(al ser un lenguaje interpretado)
Gran potencia	No tan seguro como otros lenguajes
Facilidad de aprendizaje	Necesario conocer lenguaje C
Interactividad	
Orientado a objetos	
Lenguaje de propósito general	

Tabla 5.Ventajas e inconvenientes de Phyton.

- C++:

Sus principales características se muestran en la tabla:

Ventajas	Inconvenientes
Portabilidad	No tiene recolector de basura
Gran potencia	No orientado a objetos puramente como Java
Facilidad de aprendizaje	No tiene polimorfismo
Interactividad	Se produce un ejecutable válido sólo para una plataforma concreta(al ser compilado)
Adaptación a la Orientado a objetos	Inseguro
Lenguaje de propósito general	Híbrido

Tabla 6.Ventajas e inconvenientes de C++.

- Java:

A continuación, sus ventajas e inconvenientes se describen en la tabla:

Ventajas	Inconvenientes
Muy portable	Más lento que otros(al ser un lenguaje interpretado)

Programación orientada a objetos	Utiliza gran cantidad de memoria
Robusto	No puede acceder a recursos de bajo nivel
Seguro	
Dinámico	
Interpretado	

Tabla 7. Ventajas e inconvenientes de Java.

- Matlab:

Seguidamente, se explican las características:

Ventajas	Inconvenientes
Aplicación numérica y científica	Consumo de recursos
Librería y toolboxes para procesamiento de señal	Más lento que lenguajes compilados (al ser lenguaje interpretado)
Permite programación estructurada y orientada a objetos (versión 2008a)	No tiene implementaciones paralelas
Programación sencilla (programación intuitiva)	
Gráficos	
Robusto y permite modularidad	
Portable	

Tabla 8. Ventajas e inconvenientes de Matlab.

- Haskell:

Sus ventajas e inconvenientes son los siguientes:

Ventajas	Inconvenientes
Aplicación matemática	No permite el uso de asignación de variables
Lenguaje funcional	No permite secuenciación para programar

Recursividad	No posee iteración de instrucciones
--------------	-------------------------------------

Tabla 9. Ventajas e inconvenientes de Haskell.

4.3.7 Elección del lenguaje.

Debido a las necesidades comentadas en apartados anteriores, el lenguaje elegido debe ser portable, para ejecutarlo en otras plataformas. Además, debe ser robusto para soportar la carga matemática que conlleva el desarrollo de este proyecto, valorando positivamente las librerías o funciones dedicadas al tratamiento de señales.

El proyecto tiene diferentes módulos soluciones por lo que debe ser un lenguaje de programación estructurada y flexible para los posteriores cambios o mejoras. Puesto que las pruebas de audio requieren cierta velocidad para que la calificación subjetiva de las personas con deficiencias auditivas sea eficiente, el tiempo de ejecución de los diferentes algoritmos debe ser reducido.

El desarrollo de este proyecto tiene un fin didáctico, por lo que es una gran ventaja la posibilidad de representar gráficamente el funcionamiento de los módulos solución. También se tiene en cuenta la posibilidad del aprovechamiento óptimo de los recursos que se tienen.

Por lo que entre los lenguajes anteriormente descritos, se elige Matlab por cumplir cada uno de los requisitos y necesidades descritas. A continuación se explican brevemente algunas características del lenguaje en concreto seleccionado como mejor opción para el desarrollo de este proyecto.

Matlab es un gran programa de cálculo técnico y científico y es una magnífica herramienta de alto nivel para desarrollar aplicaciones técnicas. Entre sus ventajas se encuentra la facilidad de utilización y el aumento significativo de la productividad de los programadores respecto a otros entornos de desarrollo.

Matlab es un lenguaje de programación interpretado e interactivo, esto significa que a diferencia de C o Fortran no se generan ejecutables sino que es un programa llamado intérprete que recibe órdenes y las ejecuta. Estas órdenes se comunican al intérprete mediante un lenguaje de programación que recibe el mismo nombre que el programa, Matlab. Entonces utilizar Matlab es equivalente a programar en Matlab.

De las características de Matlab podemos destacar: el cálculo numérico rápido, la visualización avanzada de gráficas, la programación estructurada y orientada a objetos, la cualidad de multiplataforma, la gran extensión de biblioteca de funciones y las aplicaciones avanzadas en algunos temas.

Como ya se ha mencionado anteriormente, Matlab dispone de un código básico y de varias librerías especializadas (toolboxes) que sirven de gran utilidad en el desarrollo de este proyecto.

4.4 Descripción del procesamiento y reproducción de la señal de audio.

4.4.1 Descripción de procesamiento de la señal de voz.

Gracias a las librerías que facilita el lenguaje elegido, tal y como se explica en el apartado 4.3.5 Elección del lenguaje, el procesamiento de la señal es mucho más sencillo. Por esta razón, se analizan brevemente algunas funciones generales o metodología utilizada en la implementación de los algoritmos de los métodos que se desarrollan [44].

Con la función `wavread` de Matlab se lee la señal de audio en formato “.WAV” y se almacenan los datos muestreados como un vector en la variable “y”. También nos proporciona el valor de la frecuencia de muestreo y el número de bits.

```
[y,fs] = wavread('pueblos.wav');
```

Para el correcto tratamiento de la señal de voz es necesario, identificar si la señal de audio es estéreo o mono. El sonido monoaural o mono es el sonido que sólo está definido por un canal y que origina un sonido semejante al escuchado sólo por un canal, mientras que el sonido estéreo es aquel definido por varios canales.

Para evitar las diferencias entre las grabaciones de audio monoaural y estéreo, se decide tratar con todas las señales de audio estéreo, es decir, utilizando dos canales.

```
if isvector(y)==0
    estereo=1;
end
else
    estereo=0;
    x=zeros(length(y),2);
    x(:,1)=y;
    x(:,2)=y;
end
```

Debido a que las personas objeto de estudio de este proyecto tienen diferentes patologías dependiendo del oído por el que escuchan las grabaciones, todos los métodos se analizan por separado cada canal (izquierdo y derecho).

```
canal_izdo=x(:,1);
canal_dcho=x(:,2);
```

Al finalizar el algoritmo de cada método resolución, la señal debe poder ser reproducida en estéreo.

```
matriz=zeros(length(fvf_D),2);
matriz(:,1)=fvf_I;
matriz(:,2)=fvf_D;
```

Con la función `wavplay` de Matlab se reproduce la señal de audio, a partir de los datos almacenados y la frecuencia de muestreo.

```
wavplay(x,fs)
```

Además, con la función `wavwrite` de Matlab se puede crear un archivo de audio en formato “.WAV”, a partir de los datos almacenados, la frecuencia de muestreo, los bits por muestra y el nombre del archivo.

```
wavwrite(v2,fs,16,'OUT_Traslación.wav');
```

Para el tratamiento de la señal en el dominio de la frecuencia, es decir, el cálculo de la FFT (Fast Fourier Transform) es necesario utilizar la función `fft` de Matlab. Aprovechamos esta función para calcular el número de puntos de la FFT (Fast Fourier Transform), es decir, “L”. Este parámetro sirve para reducir el número de operaciones en el cálculo de la DFT (Discrete Fourier Transform).

El valor de L debe ser una potencia de 2, es decir 2^n . Por eso, para obtener dicho parámetro se utiliza la siguiente línea de código:

```
L = 2^nextpow2(length(x));
```

Los algoritmos FFT se basan en la reducción y descomposición en secuencias de longitud N de transformadas discretas de Fourier de longitudes más pequeñas.

```
fv_D=fft(canal_dcho,L);
```

Para regresar al dominio temporal una vez que se ha realizado la FFT, MATLAB cuenta con la función `ifft`.

```
v2=real(ifft(matriz,L));
```

Para simplificar el procesamiento de las señales de voz, se decide eliminar los periodos de silencio al principio y al fin de las grabaciones, para evitar el ruido.

```
% Se recorta la parte final del array de audio con ruido sin información
s_real=senal_real(1:length(x),:);
```

```
% Se recorta la parte inicial y media del array de audio con ruido sin
información
for i=1:length(x)
    if x(i,1)==0
        s_real(i,1)=0;
        s_real(i,2)=0;
    end
end
```

Una de las grandes aplicaciones de MATLAB es la posibilidad de realizar gráficos que satisfagan las necesidades del creador del programa. En este caso son de gran utilidad los gráficos que se crean para demostrar los efectos de cada método utilizado.

```
subplot(2,1,1);
```

```
plot(s_real);
grid on;
zoom;
title('Espectro de señal entera salida');
```

4.4.2 Descripción de cómo se ha desarrollado cada módulo solución.

Tal y como se ha comentado anteriormente, los métodos implementados tienen el objetivo de evaluar de forma preliminar si son válidos para posteriores desarrollos. Por tanto, aunque existen multitud de formas de realizar el procesado no lineal de la señal de voz, en este proyecto se ha centrado la atención en tres pilares: la traslación, el escalado y la amplificación.

En este apartado se explican con detalle la implementación de cada uno de los módulos desarrollados en el proyecto.

• Módulo traslación lineal.

Tal y como se ha comentado anteriormente, este método está basado en la idea intuitiva de la traslación de la información que está contenida en la región muerta a otras regiones con mejor audición.

Para el desarrollo de este método es necesario la estimación de la región muerta de la manera más precisa posible. Para ello es necesario una fase de definición de variables, para determinar la región muerta de cada oído de forma independiente.

```
f_inferior_I=200; %frecuencia inferior de región muerta del oído
izquierdo
f_superior_I=3000;%frecuencia superior de región muerta del oído
izquierdo
f_inferior_D=200; %frecuencia inferior de región muerta del oído derecho
f_superior_D=3000; %frecuencia superior de región muerta del oído
derecho
```

Para el desplazamiento de la región muerta, es necesario almacenar la información de la señal de voz en las frecuencias de la región muerta. Para ello se deben buscar dichas frecuencias y guardar sus valores.

Como este método está pensado para ser utilizado con diferentes pacientes con distintas patologías, la longitud de la región muerta es variable, por lo que para facilitar el desplazamiento de la región muerta se calcula la frecuencia central de dicha región.

Este módulo desplaza toda la información de la región muerta hacia frecuencias más altas, porque está pensado para pacientes que padezcan hipoacusia de frecuencias bajas y medias en el espectro total de la señal.

```
rango_I=find(F>f0_I & F<f1_I);%Encuentra posiciones del vector de
frecuencias de la región muerta del oído izquierdo
```

```

rango_D=find(F>f0_D & F<f1_D);%Encuentra posiciones del vector de
frecuencias de la región muerta del oído derecho

mitad_RI=floor(length(rango_I)/2);% Mitad de rango del oído izquierdo
mitad_RD=floor(length(rango_D)/2);% Mitad de rango del oído derecho

rango_ini_D=rango_D(1);%Posición inicial del rango muerto del oído
derecho
rango_fin_D=rango_D(length(rango_D)); %Posición final del rango muerto
del oído derecho
long_rango_D=length(rango_D); %Longitud del rango muerto del oído
derecho

```

De forma intuitiva, para no perder la mayor parte de la información relativa a la zona con problemas de audición, se decide rellenar con “información vacía” la región muerta y desplazar la información que había en dicha zona a frecuencias más altas. Para ello, se modifica la longitud de la señal resultante.

Básicamente, la traslación lineal de frecuencias consiste en desplazar la información de la región muerta a otra región en la que el paciente no tenga ningún problema de audición. Por esta razón, la señal se pasa al dominio de la frecuencia y se desplaza la información de la región muerta hacia otra región situada a la derecha, que no supone ningún problema de audición.

Toda la información referente a otras frecuencias inferiores a la frecuencia inicial del segmento muerto permanece intacta. En cambio, la información de las frecuencias superiores a la frecuencia final del segmento con problemas, sufre un desplazamiento hacia frecuencias superiores.

```

for j=1:lon
    if(j<rango_ini_I)% Si la frecuencia es menor del rango
inicial muerto
        matriz_nuevo(j,1)=y_fft(j,1); %Calculo la transformada
de Fourier
    elseif(j>rango_fin_I)% Si la frecuencia es mayor del rango
inicial muerto
        matriz_nuevo(j+long_rango_I,1)=y_fft(j,1); %Copio el
valor de una posición desplazada en un vector nuevo
    elseif((j>=rango_ini_I) & (j<=rango_fin_I))% Si la
frecuencia es mayor del rango inicial muerto y menor que el rango final
muerto
        matriz_nuevo(j,1)=0; % Coloco a cero el valor
matriz_nuevo(j+long_rango_I,1)=y_fft(j,1);% %Copio el
valor de una posición desplazada en un vector nuevo
    end
end

```

Este método ha sido desarrollado como fase preliminar al método traslación circular, porque aunque el pilar principal de este método es el desplazamiento de la información se producen pérdidas no asumibles. Por este motivo, se desarrolla el método traslación circular que se basa en el desplazamiento circular de la información.

• Módulo traslación circular

Como la señal de voz no es estacionaria (los parámetros estadísticos promedios no son constantes en el tiempo), no se puede utilizar la transformada de Fourier de forma directa, puesto que se obtendrían múltiples solapamientos. Por ello, se utiliza la Transformada de Fourier de forma localizada, por lo que se necesita dividir la señal original en bloques más pequeños, es decir, se procede al entramado de la señal.

El entramado de la señal se puede considerar como la multiplicación de la señal original por una señal rectangular de tamaño inferior a la señal original. Esta multiplicación en el dominio temporal se traduce en una convolución en el dominio frecuencial.

Cuando una señal se procesa en bloques, las discontinuidades cerca del final de los bloques crean problemas de superposición. Por eso, an analysis block of sound is usually weighed by a window function which, un bloque suele ser entramado utilizando una ventana que se adapte a las necesidades de cada procesado, con el fin de reducir de forma gradual la amplitud de la señal cerca de los extremos de cada bloque. Para minimizar efectos indeseados como los cortes abruptos de la señal se debe emplear la clase de ventana adecuada. Para ello, se necesita discutir sobre las características de las ventanas.

Para la elección de la ventana en el código se han tenido en cuenta dos aspectos: el tamaño y la clase de ventana.

El tamaño de la ventana debe ser lo suficientemente pequeño como para que los parámetros promedios en el tiempo no varíen, es decir, que no existan variaciones del pitch dentro de la misma ventana y se pueda utilizar la Transformada de Fourier localizada aprovechando la cuasi-estacionariedad de cada trama. Además, el tamaño de la ventana debe ser lo suficientemente grande para que existan varios periodos dentro de la ventana.

Ante las ventajas e inconvenientes de cada elección, es necesario encontrar un compromiso entre los dos aspectos y se ha elegido un ancho de ventana de 512 muestras.

```
Ancho_ventana = 512;    %Definimos el ancho de la ventana
```

Para la elección de la clase de ventana a utilizar, se han estudiado los efectos que provocan en el dominio de la frecuencia diversos tipos de ventanas como la rectangular, triangular, hamming, etc.

Si el lóbulo principal de la ventana es ancho se produce un suavizado espectral, lo que implica una menor resolución de detalles en el espectro. En cambio, si la amplitud de los lóbulos secundarios es grande, se acentuarán las pérdidas, puesto que unas frecuencias interaccionan con otras provocando errores en las amplitudes.

Como en la señal de voz puede haber interferencias cercanas a la frecuencia de interés, se escoge una ventana con grandes diferencias entre la amplitud del lóbulo principal y la amplitud de los lóbulos secundarios.

El tipo de ventana que cumple con los requisitos de lóbulo principal estrecho y lóbulos secundarios pequeños, es la ventana hamming. Una vez que ha sido seleccionada el tipo de ventana a utilizar, se utiliza la Transformada de Fourier para pasar la señal de voz al dominio de la frecuencia, para que el enventanado resulte más sencillo.

```
ventana = hamming(Ancho_ventana); %Guardamos en la variable ventana el
tipo de ventana con el ancho anterior
```

Para que la señal pueda ser reconstruida correctamente, es necesario que se defina un solapamiento que garantice que no se introduzcan distorsiones generadas al modificar el espectro en dos bloques sucesivos. En este caso, después de varias pruebas con diferentes valores de solapamiento, se elige la siguiente forma de encontrar el solapamiento que permita obtener mejores resultados:

```
solape2_I = fix((1 -0.67)*Ancho_ventana);
```

Para el análisis del pitch, es necesario dividir la señal en partes (enventanado) y recorrer la toda señal y estudiar cada uno de los segmentos de señal de forma individual.

```
while(i<numero_trozos_D)

    x_trozo_I=canal_izdo(pos_inicial_I:pos_final_I);
    %Cogemos el primer trozo de la señal

    enventanado_I = x_trozo_I.*ventana;%Enventanamos un trozo de la
    señal
    L = 2^nextpow2(length(x));%Calculamos el número de puntos óptimo
    para obtener la fft
    F=fs/2*linspace(0,1,L/2);%Creamos un vector de frecuencias
    equiespaciadas
```

En cada bloque se debe buscar la frecuencia fundamental o pitch, para ello se debe encontrar la frecuencia de mayor amplitud, teniendo en cuenta que a veces las amplitudes de los armónicos (múltiplos de las frecuencias fundamentales) son mayores que la amplitud de la frecuencia fundamental. Para evitar confundir a un armónico con la frecuencia fundamental se estudian todas las amplitudes de las frecuencias previas. Todas las frecuencias anteriores que superen en amplitud el 10% del mayor valor de amplitud, serán consideradas como posibles pitch. Si las frecuencias anteriores no superan el 10% del pico principal, se considerará que la trama no presenta un pitch reconocible.

```
posicion_I=find(F<=20000);
%Solo nos interesan las posiciones de las frecuencias menores de
20000Hz, porque los tonos agudos oscilan entre 5000Hz y 20000Hz
posicion es un array con los indices de posición de las frecuencias
menores de 20000

F_nueva_I=F(posicion_I);
%F_nueva es un array con los valores de frecuencia encontrados que
%son menores de 20000

y_fft_I=fft(enventanado_I,L);%FFT del trozo de la señal
correspondiente
y_I=abs(y_fft_I(1:length(F_nueva_I)));%Hacemos el módulo de la y_FFT
cogiendo sólo los valores hasta 20000Hz
```

```

[v_max_I pos_max_I]=max(y_I);    %Hallamos el valor máximo de y la
posición maxima de y

i=i+1;
if (pos_max_I~=1) %Si la pos_max es distinta de 1...
    F_max_I=F_nueva_I(pos_max_I);    %Obtenemos la frecuencia
correspondiente a la posición de máxima amplitud
    diezporciento=0.1*v_max_I;    %Calculamos el 10% de la amplitud
máxima para hallar los posibles pitch
    F_interesantes_I=F_nueva_I(1:pos_max_I-1);    %Nos quedamos con
las frecuencias anteriores a la máxima para buscar los posibles pitch
    Y_interesantes_I=y_I(1:length(F_interesantes_I));    %Cogemos los
valores anteriores a la máxima para buscar los posibles pitch
    pos_interesantes_I=find(Y_interesantes_I>=diezporciento);
%Buscamos las posiciones de las frecuencias mayores o iguales que las
halladas con el 10% para obtener los posibles pitch
    F_pos_pitch_I=F_interesantes_I(pos_interesantes_I);    %Nos
quedamos con las frecuencias de las posiciones obtenidas

```

Posteriormente, se normalizan los valores de las frecuencias de las posibles frecuencias fundamentales respecto a la frecuencia de mayor amplitud, teniendo en cuenta que sólo nos interesan las frecuencias de los sonidos agudos, que en este proyecto son objeto de estudio. Por este motivo, sólo se analizan las frecuencias menores de 20000Hz, porque los tonos agudos oscilan entre 5000Hz y 20000Hz. Seguidamente, se considera pitch el valor de frecuencia que tenga menor parte decimal.

```

v_pitch_I=F_max_I./F_pos_pitch_I;    %Vector de los posibles
pitch
v_pitch_entero_I=round(v_pitch_I);    %Redondeamos los decimales
al entero más próximo
v_pitch_decimales_I=abs(v_pitch_I-v_pitch_entero_I);    %Restamos
los posibles pitch de los enteros para obtener los decimales

[pitch_valor_I pitch_pos_I]=min(v_pitch_decimales_I);
%Obtenemos el mínimo decimal y su posición

pitch_I(i)=F_pos_pitch_I(pitch_pos_I);    %Guardamos la
frecuencia de la posición del mínimo valor

else    %Si la pos_max es igual a 1...

    pitch_I(i)=F_nueva_I(pos_max_I);    %Guardamos la frecuencia
de la posición del máximo

end    %Fin del if

pos_inicial_I=pos_inicial_I+solape2_I;    %Actualización de la
posición inicial
pos_final_I=pos_final_I+solape2_I;    %Actualización de la posición
final

end

```

Para cada bloque existe un pitch diferente, por lo que después de haber analizado cada bloque separadamente, se realiza un promedio de los valores de pitch, de esta forma queda estimado un valor de pitch para toda la señal.


```

aux=0;
frecuencias=0;
for i=1:length(pitch_I)
    if(pitch_I(i)~=0)

        if frecuencias < pitch_I(i)
            frecuencias=pitch_I(i);
        end
    end
end
media_I=frecuencias*2;
mediaaux_I=mean(pitch_I);    %Calculamos la media de las frecuencias del
vector pitch

```

Una vez que ya ha sido estimado el pitch, se obtiene el espectro de la señal de voz completa a partir de la Transformada de Fourier. Puesto que el espectro es simétrico, elegimos tan solo la mitad de dicho espectro para continuar con el análisis.

```

fv_I=fft(canal_izdo,L);
lon=length(fv_I);
fv1_I=fv_I(lon/2:lon-1);
fv1_I=fv1_I'; %Trasposición

```

Se realiza un desplazamiento circular de las frecuencias, para desplazar la frecuencia fundamental sin perder ninguna información. De esta manera, las personas que tengan alguna dificultad en escuchar alguna frecuencia en concreto resultarán beneficiadas.

El desplazamiento circular frecuencial obtiene mejores resultados cuando se realiza por un factor lineal constante, en este caso se duplicó la frecuencia. Aunque este parámetro es posible modificarlo.

```

df_I=media_I;
dn_I=floor(df_I/fs*L); %Redondea al entero más próximo
fvf_I=zeros(1,lon); %Creamos el vector de ceros de la longitud L

b=circshift(fv1_I,dn_I); %El circshift funciona para vectores columna
fvf_I(1:lon/2)=b(1:lon/2);

fvf_I=fvf_I'; %Trasposición inversa

```

En la siguiente figura se puede ver un ejemplo de desplazamiento circular del espectro de la señal de voz realizado con la aplicación:

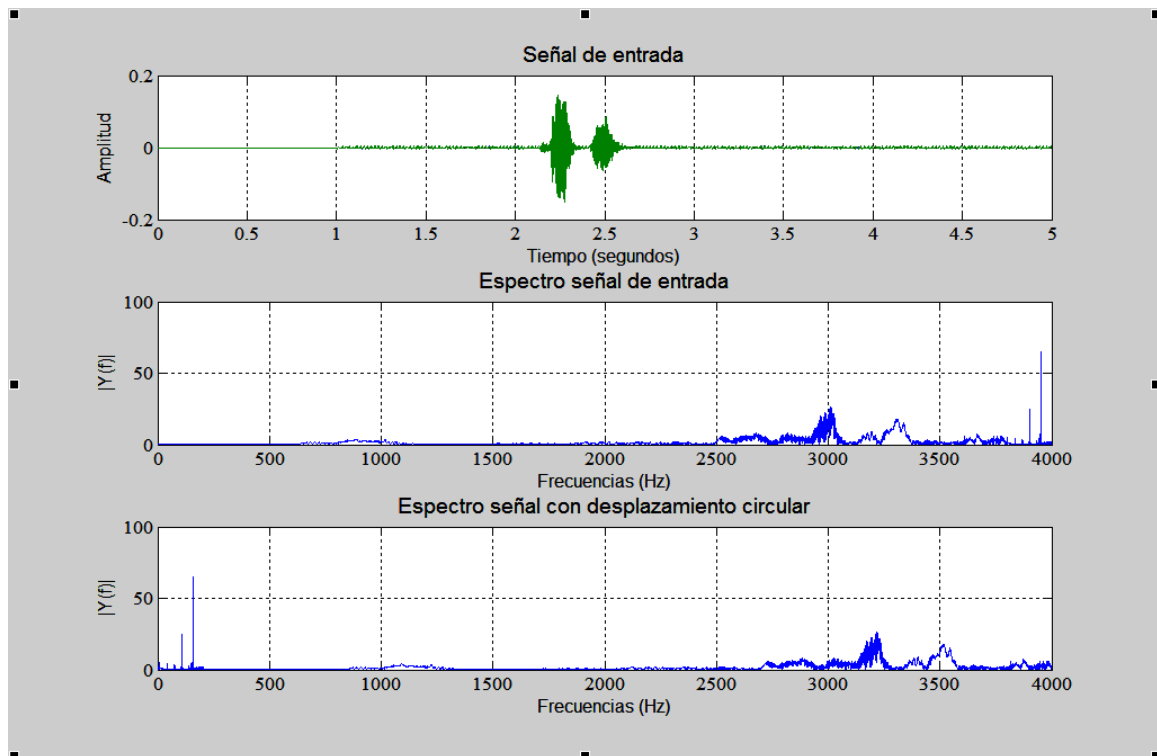


Figura 65. Señal de entrada, espectro de la señal y espectro de la señal con desplazamiento circular.

- **Módulo amplifica.**

Para el desarrollo de este módulo se debe conocer de la manera más exacta posible, los límites de la región muerta de cada oído. En los casos prácticos, se demuestra que la región muerta del oído derecho en la mayoría de las veces es diferente de la del oído izquierdo. Por lo que se definen por separado, como se muestra a continuación.

```
f_inferior_I=200; %frecuencia inferior de región muerta del oído
izquierdo
f_superior_I=3000;%frecuencia superior de región muerta del oído
izquierdo
f_inferior_D=200; %frecuencia inferior de región muerta del oído derecho
f_superior_D=3000; %frecuencia superior de región muerta del oído
derecho
```

En la fase de definición de variables, es necesario detallar la cantidad de amplificación. Como se comenta en el párrafo anterior, este valor también varía generalmente de un oído a otro.

```
cantd_amplif_I=15; %cantidad de amplificación en dB de oído Izquierdo
cantd_amplif_D=15; %cantidad de amplificación en dB de oído Derecho
```

Esta cantidad de amplificación se ha definido expresada en la unidad común (dBs), pero para realizar los cálculos de una manera más sencilla se decide expresarla en unidades naturales.

Este método sólo amplifica las frecuencias comprendidas entre los límites anteriormente definidos de la región muerta. Por este motivo, es necesario buscar dichas frecuencias en todo el vector de frecuencias de la señal original.

Una vez que se han encontrado las frecuencias pertenecientes a la zona muerta, basta con una simple multiplicación de la señal original por la cantidad de amplificación en unidades naturales.

```
if ((F(i)>= bad_fre_inferior_I) & (F(i)<=bad_fre_superior_I))
    %calculamos la equivalencia de DB's de amplificación en unidades
    naturales
        Amplifica_I=10^(cantd_amplif_I/10);
        senal_entera(i,1)=senal_entera(i,1)*Amplifica_I;
    end
    if ((F(i)>= bad_fre_inferior_D) & (F(i)<=bad_fre_superior_D))
        %calculamos la equivalencia de DB's de amplificación en unidades
        naturales
            Amplifica_D=10^(cantd_amplif_D/10);
            senal_entera(i,2)=senal_entera(i,2)*Amplifica_D;
        end
    end
end
```

• Módulo escalado.

Este método se basa en el cambio de tono de una señal de voz. Está técnica se desarrolló con la idea de que los pacientes con dificultades para escuchar las voces agudas pudieran escuchar la misma señal de voz en un tono más grave, o viceversa.

Para la implementación de este método se necesita la estimación de la región muerta de la manera más concisa posible, como en los métodos anteriores. Para ello es necesario la misma fase de definición de variables, para determinar la región muerta de cada oído de forma independiente, que se ha comentado anteriormente.

En la fase de definición de variables, además de los límites inferiores y superiores de cada oído de la zona coclear muerta, se necesita la determinación del parámetro alfa que representa el factor de compresión o ensanchamiento. Este factor de compresión/estiramiento oscila entre 0,25 y 2, para que no se produzcan distorsiones indeseadas. El rango de este parámetro se ha definido a base de ensayo y error, teniendo en cuenta las limitaciones del procesador del ordenador.

```
alfa=0.25;
```

La compresión se realiza cuando el valor del parámetro oscila entre 0,25 y 1, mientras que para el estiramiento de la señal se encuentra entre 1 y 2. En concreto, el valor unidad no realiza ninguna modificación en la longitud de la señal original.

Una vez que se ha determinado dicho parámetro, se modifica la longitud de la señal multiplicando por alfa, para obtener un estrechamiento o estiramiento en el dominio temporal.

```
if(compresion>=0.25 & compresion<=2)

%Estrechamiento/estiramiento en el tiempo

    tamano_original = length(x);
    tamano_modificado = ceil(tamano_original * alfa);
    canal_izdo = canal_izdo';%Convertimos en vector fila
end
```

La señal original se segmenta en N bloques de un número de muestras determinado.

```
muestras_bloque = 256; %Número de muestras en cada bloque del segmento
original
    N = 1024; %Tamaño de cada bloque
```

Respecto a la señal modificada también se segmenta en bloques de tamaño modificado con un número de muestras determinado teniendo en cuenta el factor de compresión/estiramiento.

```
muestras_modificadas =round(muestras_bloque*alfa);%Número de muestras en
cada bloque de longitud N
numero_bloques_I = ceil(tamano_original/muestras_bloque); %Redondeo
superior del número de bloques
```

Más adelante, similar segments for the periodic parts of the sound in order to change the length of the se calculan los puntos de similitud entre los segmentos, mediante una correlación cruzada. Para ello, se tienen en cuenta los desvanecimientos creciente y decreciente de dos segmentos para minimizar el efecto del solapamiento de longitud L entre bloques. Es decir, se intenta relacionar cada muestra de la señal original con cada muestra de la señal modificada.

```
%Autocorrelacion en los solapamientos de los bloques
for i=1:numero_bloques_I-1

L = muestras_bloque*alfa/2; %Longitud del solapamiento
g_I=canal_izdo(i*muestras_bloque+1:N+i*muestras_bloque);%Selecciona el
número de muestras de cada bloque ampliado

x_corr_I=xcorr(g_I(1:L),x_modificada_I(1,i*muestras_modificadas:i*muestr
as_modificadas+(L-1)));%Calcula el vector correlacion entre el
solapamiento y el bloque

    [xmax_I(1,i),index_I(1,i)]=max(x_corr_I);%Selecciona el valor máximo
de correlación y su posición
```

En este método se definen unas funciones de desvanecimiento, una para el creciente fadein y otra para el decreciente fadeout, para evitar las distorsiones indeseadas de los solapamientos.

```

        fadeout_I=1:(-1/(length(x_modificada_I)-(i*muestras_modificadas-(L-1)+index_I(1,i)-1))):0;%Función decreciente de desvanecimiento

        fadein_I=0:(1/(length(x_modificada_I)-(i*muestras_modificadas-(L-1)+index_I(1,i)-1))):1;%Función creciente de desvanecimiento

        final_I=x_modificada_I(1,(i*muestras_modificadas-(L-1))+index_I(1,i)-1:length(x_modificada_I)).*fadeout_I;%Multiplico funcion desvanecimiento por el final del bloque

        inicio_I=g_I(1:length(fadein_I)).*fadein_I;%Multiplico funcion desvanecimiento por el comienzo del bloque

        suma_I=final_I+inicio_I;%Suma de desvanecimiento de comienzo y fin
        x_modificada_I=[x_modificada_I(1,1:i*muestras_modificadas-L+index_I(1,i)-1) suma_I g_I(length(fadein_I)+1:N)];%Uno el bloque sin el solapamiento con el resultado del desvanecimiento

end ;

```

Posteriormente, se adapta la señal a la longitud del tamaño modificado teniendo en cuenta el solapamiento, porque de otra forma en el proceso de reconstrucción de la señal se perdería información.

```

x_modificada_I = x_modificada_I'; %transpongo para operar
x_modificada_I = x_modificada_I(1:tamano_modificado); %Adapto la longitud del segmento total

```

De esta forma, el tiempo se extiende/comprime, por lo que la duración de la señal cambia. El tono permanece intacto mientras que varía la duración, es decir, que varía la velocidad de la señal de voz. Una vez que se ha modificado la longitud de la señal es necesario realizar un escalado en el dominio frecuencial. Para ello, se multiplica por un factor constante la señal en el dominio de la frecuencia. Posteriormente, se lleva a cabo un remuestreo en el dominio temporal.

```

L = 2^nextpow2(length(x_modificada_I));
y_fft_I=10*fft(x_modificada_I,L);
y_fft_D=10*fft(x_modificada_D,L);

```

Para el remuestreo, se decide enventanar la señal con una ventana hanning para poder analizar los segmentos la señal.

```

compresion=alfa;
N = length(x_modificada_I);
Nfft = N;
v_hanning = hanning(double(N));%Se define la ventana de tamaño N
N_comp = Nfft/compresion;

ventana_I = x_modificada_I.*v_hanning;%Número de muestras por la ventana

```

Debido a los requisitos de la función resample que pone a nuestra disposición Matlab, el valor de compresión debe ser un valor entero, es decir, sin decimales.

```

compresion_entero=round(compresion); %Redondeamos los decimales al entero más próximo

```

```

        compresion_decimales=abs(compresion-compresion_entero);%Restamos
al valor de compresion el entero para obtener los decimales

        if(compresion_decimales==0)
            x_resample_I=resample(ventana_I,1,compresion);

        else
            if(compresion<1)
                compresion_I=100*compresion_I; %Transformo el factor
de compresion a un entero sin decimales

x_resample_I=resample(ventana_I,100,round(compresion_I));%Remuestreo

            else
                compresion_I=100*compresion_I; %Transformo el factor
de compresion a un entero sin decimales

x_resample_I=resample(ventana_I,100,round(compresion_I));

            end
x_resample_I=resample(ventana_I,100,compresion_I);%Remuestreo
        end

```

La combinación del estrechamiento/ensanchamiento temporal, el escalado y el remuestreo provoca el cambio de tono deseado.

4.4.3 Descripción de una aplicación de audiometría

Para el desarrollo de tres de los cuatro métodos que se proponen se necesita una prueba de audición que pueda estimar, de manera más o menos fiable, la región coclear muerta de cada paciente.

Para la realización de dicha aplicación se han estudiado las principales pruebas que realizan las consultas de audición a sus pacientes, es decir, las diferentes clases de audiometrías [45].

Se entiende por audiometría, la prueba funcional que permite determinar el grado de audición de una persona. El principal objetivo de la audiometría es obtener los niveles mínimos de intensidad a los que el paciente es capaz de percibir estímulos sonoros. Existen varios tipos de audiometría, las más conocidas son las que utilizan un estímulo sonoro como la audiometría verbal y las que utilizan estímulos acústicos como la audiometría de tonos puros [46].

La Acumetría es una prueba exploratoria para obtener una cuantificación orientativa sobre el grado de audición. La audiometría instrumental clásica utiliza diapasones y permite averiguar si la lesión que produce la pérdida auditiva, se encuentra en el oído externo o medio (hipoacusia de conducción) o bien en el oído interno (hipoacusia de percepción). Los diapasones son sustituidos por generadores electrónicos de tonos de diferentes frecuencias como el que se muestra en la siguiente figura.



Figura 66. Audiómetro que genera diferentes frecuencias de sonido.

En la audiometría se ajusta el audiómetro a un nivel de audición determinado y se realiza un barrido de frecuencias con intensidades variables. Normalmente, los profesionales utilizan un generador de distintas frecuencias de sonido para emitir tonos puros, es decir, sonidos que el ser humano no está acostumbrado a escuchar, ya que no existen como tal en la vida diaria. Las frecuencias estudiadas son: 125 - 250 - 500 - 1000 - 2000 - 3000 - 4000 - 6000 y 8000 Hz.

Para la anotación de los resultados, es necesario una plantilla con una gráfica audiométrica donde se apuntan las respuestas a los estímulos para la posterior valoración. Esta plantilla permite:

- 1º. Valorar si la audición es normal o si existe una hipoacusia
- 2º. Conocer el umbral de audición, valorar si la hipoacusia es moderada, media o grave
- 3º. Hacer un diagnóstico de la causa de la hipoacusia
- 4º. Valoración evolutiva de la hipoacusia y orientación terapéutica

En la siguiente gráfica se muestra una audiometría genérica de los dos oídos.

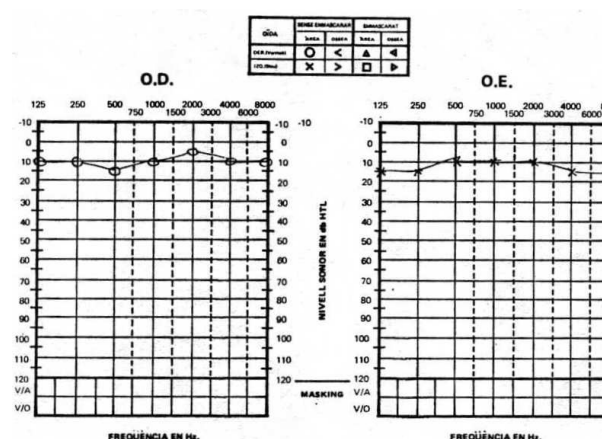


Figura 67. Audiograma normal.

Para que los métodos de resolución sean totalmente eficientes, es necesario conocer el audiograma de cada paciente. A partir de éste, se pueden identificar los rangos

de frecuencias con disfunciones auditivas. Por lo que en este proyecto, se ha desarrollado una aplicación que permite de forma eficiente, conocer la curva de audición de cada oído de cada uno de los individuos de estudio.

A continuación, se muestra la aplicación gráfica preparada para el proyecto:

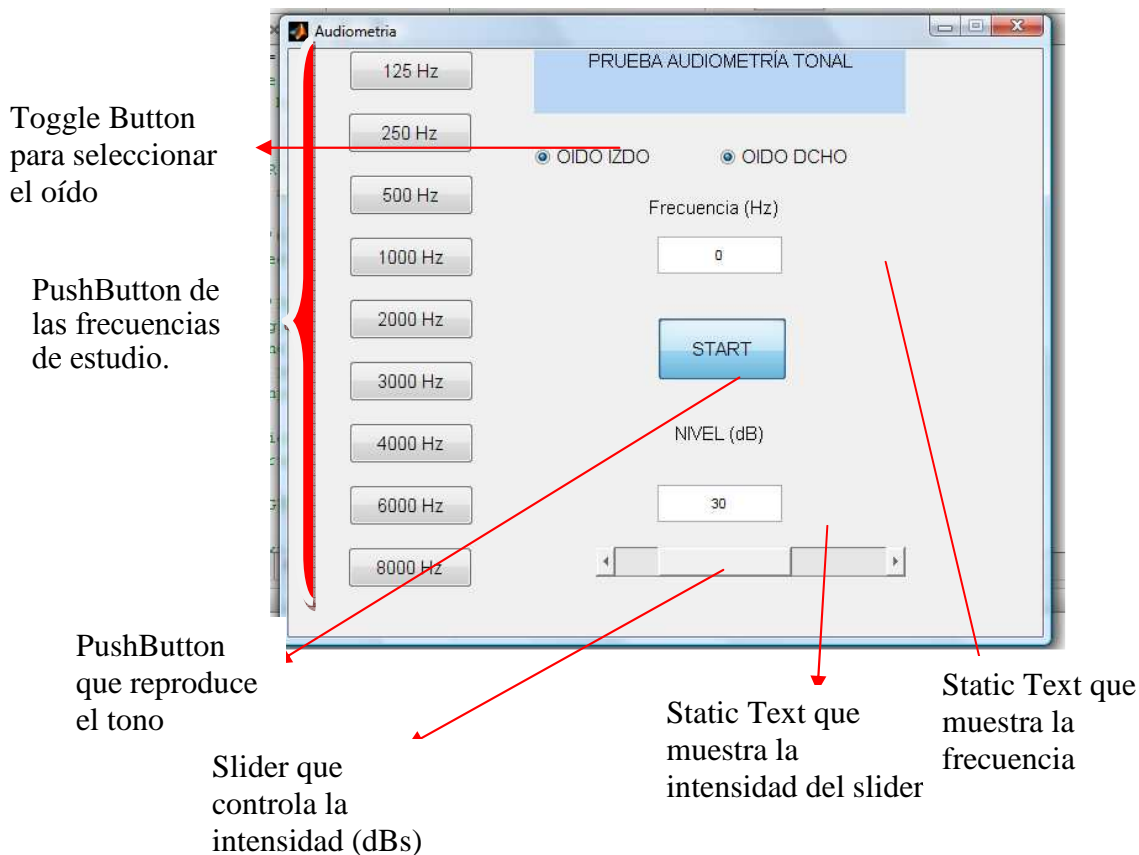


Figura 68. Aplicación Audiometría.

En la parte izquierda de la aplicación, aparecen una serie de botones con cada una de las frecuencias que se utilizan en el barrido del espectro para examinar la audición. En la parte central aparecen unos botones que permiten seleccionar si la prueba se realiza sobre uno de los oídos o ambos. También, se puede seleccionar el nivel de intensidad en dBs de la señal de la frecuencia determinada gracias a un slider.

Para la realización de la prueba tonal, se realiza un barrido de frecuencias con una intensidad determinada. Esta intensidad va aumentando gradualmente, hasta que el paciente pueda percibir cada uno de los tonos.

Una vez que se ha realizado el mismo procedimiento con las siete frecuencias que se comentan anteriormente, se obtiene un audiograma como el que se muestra:

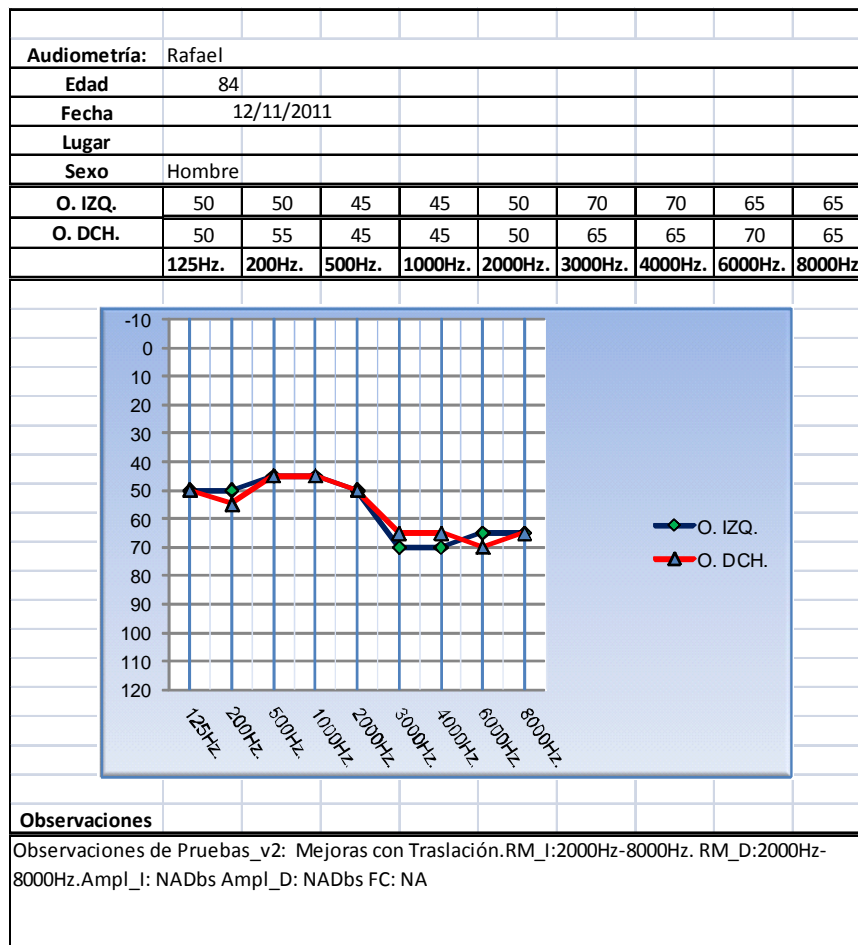


Figura 69. Audiograma.

Se realiza de forma individual cada oído, pudiendo obtener audiogramas diferentes para el oído derecho e izquierdo.

La audiometría vocal que se explica en el apartado siguiente, sirve para establecer la capacidad de comprensión del oído ante los fonemas, mientras que la audiometría tonal determina la capacidad de percepción de los tonos.

En el siguiente capítulo se describe la aplicación del programa con mayor nivel de detalle.

4.4.4 Descripción del programa de aplicación

Además de la audiometría tonal, a los pacientes también se les somete a una audiometría verbal que ofrece un mayor detalle de las disfunciones auditivas que el paciente puede sufrir.

Las audiometrías verbales que realizan los centros especializados en los problemas de audición, utilizan palabras bisílabas con diferentes fonemas transmitidas desde un micrófono a unos auriculares. El paciente debe repetir exactamente lo que

escucha a través de los auriculares. De esta forma se puede estudiar las regiones muertas de frecuencias y el porcentaje de inteligibilidad.

El procedimiento general de la audiometría verbal consiste en comenzar con la reproducción de las palabras con un nivel de intensidad determinado, por ejemplo 30 dBs, de tal forma que el paciente pueda repetir el 100% de las palabras. Posteriormente, se reduce progresivamente el nivel de intensidad al 50% (15 dBs) y a 0% (5 dBs), obteniendo una gráfica como la siguiente [47].

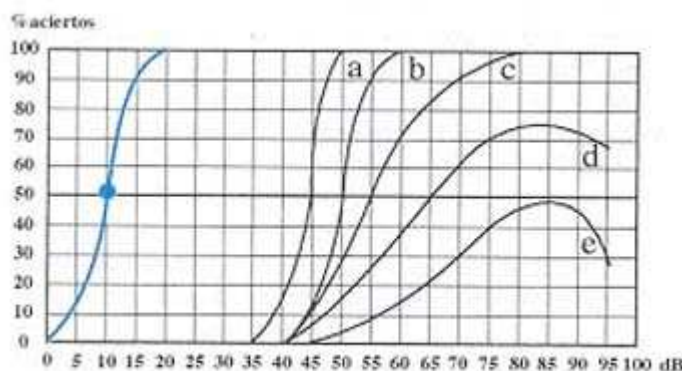


Figura 70. Curva normal (azul), curva hipoacusia de transmisión (a y b). hipoacusia neurosensorial (c, d y e).

La prueba determina el umbral de inteligibilidad y los resultados se reflejan en la gráfica que se muestra anteriormente, en cuya abscisa se indican la intensidad (dBs) y en la ordenada el porcentaje (%) de palabras reconocidas.

En este proyecto se ha desarrollado una interfaz gráfica para realizar la audiometría verbal a partir de palabras con diferentes fonemas y frases y así, definir la región muerta y evaluar la mejora producida en la inteligibilidad del paciente al utilizar los métodos propuestos.

A continuación se puede observar la interfaz gráfica de la aplicación, con una breve explicación de cada una de las diferentes partes de la que está compuesta.

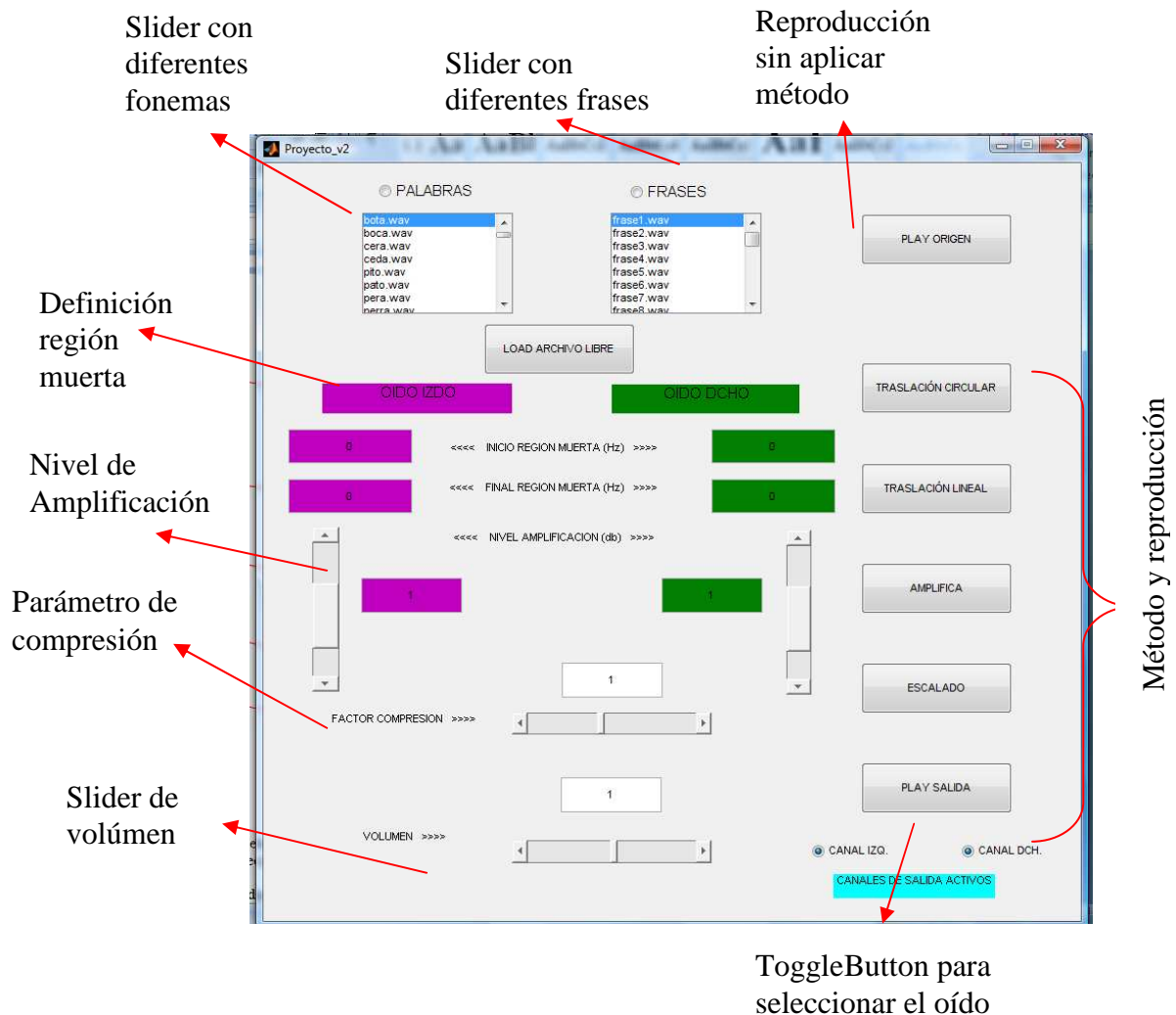


Figura 71. Aplicación del programa.

Esta prueba se realiza posteriormente a la audiometría comentada en el apartado anterior, es decir, después de haber realizado una primera estimación de la región muerta.

El procedimiento que se lleva a cabo para realizar la audiometría verbal, consiste en reproducir fonemas de frecuencias pertenecientes a la región muerta para estudiar la inteligibilidad. En esta aplicación se ofrece la posibilidad de poder reproducir una sola palabra o dos palabras, para poder observar la diferencia entre palabras parecidas.

Las palabras elegidas para la audiometría verbal son elegidas a partir de los fonemas pertenecientes a la región de frecuencias con problemas de audición, a través de la gráfica siguiente.

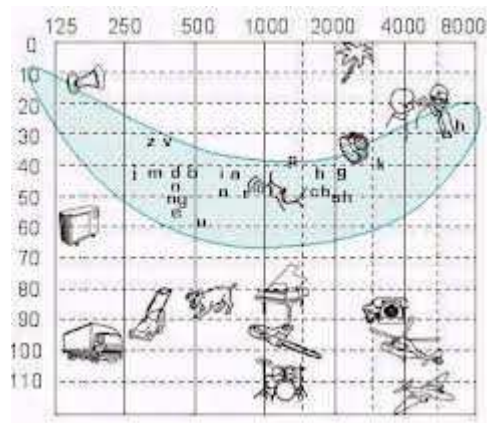


Figura 72. Fonemas.

Una vez que se ha identificado más detalladamente la zona de frecuencias con menor audición a través de las dos audiometrías, se realizan otras pruebas con palabras para identificar algunos de los parámetros variables necesarios en los métodos propuestos, como el factor de compresión o el nivel de amplificación. Finalmente, se realizan las pruebas con cada uno de los métodos sobre una misma frase y con los parámetros estimados, para estudiar las mejoras de audición en cada paciente [48].

Capítulo 5

Diseño de las pruebas y aplicación del programa

5.1 Introducción

En este capítulo se detalla el procedimiento que se lleva a cabo en la elección de la población muestral para la realización de las correspondientes pruebas de este proyecto. Para ello, se comentan las diferentes fases para determinar si una persona cumple los requisitos necesarios para el estudio de este proyecto, pacientes con una disfunción auditiva concreta, como ya se comentó en el apartado 2.3.3 Descripción y delimitación de las hipoacusias y presbiacusias.

5.2 Elección de la población muestral

Para conocer si los métodos solución desarrollados en el proyecto son eficaces para personas con presbiacusia e hipoacusia, es necesario realizar las pruebas a personas que tengan algunos indicios de padecer estas disfunciones auditivas.

Para la obtención de una población muestral que sea una representación de la población y conseguir unos resultados que se puedan generalizar y determinar alguna

conclusión, se necesita realizar las pruebas a personas de ambos sexos y un rango de edad bastante extenso.

El procedimiento seguido para conocer a personas con determinados problemas de audición que se presentasen voluntarias para realizar las pruebas, fue solicitar permisos en determinadas asociaciones y residencias para la realización de algunas pruebas.

A pesar del gran interés suscitado en un primer momento por varias asociaciones de sordos de Madrid y residencias de ancianos, por conocer el desarrollo y argumentos para la realización de las pruebas, tan sólo la asociación CECUSOR (Centro Cultural Personas Sordas de Madrid) abrió sus puertas para la realización de las pruebas. Tras una pequeña presentación y demostración al presidente de dicha asociación, se ofrece la posibilidad de utilizar su salón de reunión para realizar las pruebas a los socios voluntarios.



Figura 73. Logo de CECUSOR.

Para la realización de las pruebas, se colocan unos carteles informativos detallando unos días y unas horas determinadas para la realización de las pruebas. Sorprendentemente la acogida recibida los días acordados, superó con creces las expectativas, superando los 70 voluntarios signantes.

5.2.1 Cuestionario preliminar

Puesto que los asociados en la asociación CECUSOR tienen una gran diversidad de niveles de pérdidas de audición, se realiza un test preliminar para realizar un filtrado de los voluntarios, para no obtener resultados que contaminen las conclusiones posteriores. Además, de esta forma se puede acotar un poco entre las personas voluntarias con otro tipo de pérdidas de audición que no son objeto de este proyecto.

En el Anexo I, se adjunta el cuestionario que se utiliza para realizar el filtrado entre todos los voluntarios.

Después de realizar el cuestionario a un grupo de personas, se realizará un cribado en función de sus respuestas, para elegir a la población muestral que pueda tener problemas de presbiacusia o hipoacusia.

Según el cuestionario, las respuestas “Sí” o “Siempre” equivalen a 2 puntos, las respuestas “A veces” 1 punto y las respuestas “No” o “Nunca” 0 puntos. Una puntuación menor de 12 puntos descarta en principio cualquier tipo de discapacidad auditiva, un resultado entre 12-20 puntos sugiere un déficit auditivo leve o moderado, por último un resultado mayor de 20 puntos, el individuo es sugestivo de una hipoacusia.

Una vez que se han seleccionado las personas que son susceptibles de padecer hipoacusia y disfunciones leves o moderadas, se procede a la realización de las pruebas tonales para poder determinar regiones cocleares muertas y otras deficiencias auditivas. Es necesario destacar que la población muestral objeto de estudio pertenece a una muestra de población signante, es decir, que se comunica por el lenguaje de los signos.

5.2.2 Prueba tonal

La primera prueba que se propone para identificar a las personas con alguna deficiencia auditiva, es la prueba tonal. Esta prueba es totalmente subjetiva y requiere de la colaboración del paciente, por lo que se confía en su precisión y veracidad en las respuestas. Como ya se ha dicho, únicamente con esta prueba no se pueden extraer conclusiones definitivas.

El objetivo principal es la obtención de los niveles mínimos de intensidad a los que el paciente es capaz de percibir los estímulos en forma de tonos. El umbral de audición para un tono puro es el mínimo nivel de intensidad al cual es oído en un 50% del número de veces que se presenta.

Para la realización de las pruebas se solicita que todos los pacientes eliminen cualquier tipo de audífono que tengan en funcionamiento para no contaminar el resultado de las pruebas realizadas.

El modo de funcionamiento de la aplicación se explica a continuación:

1º Se colocan unos auriculares al paciente y otros a la persona que controla la audiometría. Es necesario comprobar el correcto acoplamiento de los auriculares y su posición (auricular derecho en oído derecho y auricular izquierdo en oído izquierdo) para que las pruebas se realicen de manera satisfactoria.

2º Se explican las instrucciones al paciente “Usted va a escuchar unos sonidos por el oído izquierdo/derecho o ambos. Por favor levante la mano cuando crea que percibe cualquier estímulo sonoro”

3º Seguidamente, se presiona el botón de una frecuencia determinada y se comprueba que en el panel estático de la interfaz gráfica aparezca la frecuencia seleccionada.

4º Se elige un nivel de intensidad bajo, por ejemplo 10dBs, y se presiona el botón START para que se reproduzca el tono. Si el paciente no percibe el tono se aumenta de 5dBs en 5dBs la intensidad.

5° Se apunta en el audiograma la intensidad mínima a la que el paciente es capaz de percibir el tono de la frecuencia determinada. En ocasiones el paciente puede, sin tener intención, falsear los resultados, al presentar los tonos de forma rítmica.

O. IZQ.	50	50	50	45	50	50	45	45	50
O. DCH.	50	50	70	70	65	70	65	50	55
	125Hz.	200Hz.	500Hz.	1000Hz.	2000Hz.	3000Hz.	4000Hz.	6000Hz.	8000Hz.

Tabla 10. Niveles de intensidad para determinadas frecuencias

Para la correcta estimación de los niveles de audición, primero se realiza la audiometría tonal del oído izquierdo y luego del derecho. En el audiograma se representa con diferente código de colores (oído derecho de color rojo y oído izquierdo de color verde).

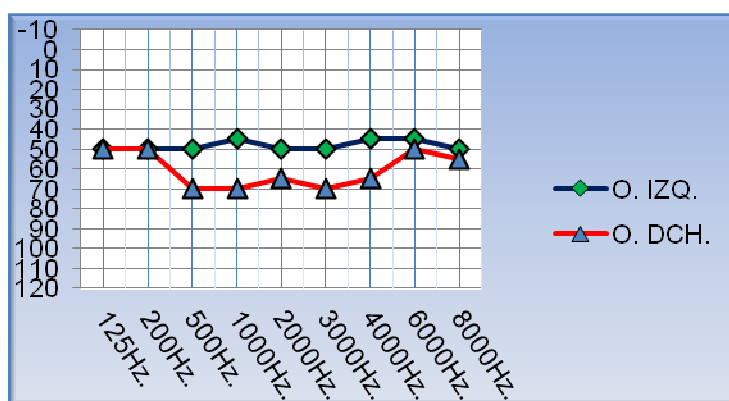


Figura 74. Audiograma.

Para la extracción de conclusiones posteriores, en cada prueba realizada se anotan varias características referentes al paciente (nombre, sexo y edad) y a las circunstancias (fecha y lugar). Los nombres que aparecen en las diferentes fichas son ficticios con el objetivo de proteger el anonimato de los voluntarios.

Audiometría: Rosa María	
Edad	50
Fecha	12/11/2011
Lugar	Club social
Sexo	Mujer

Tabla 11. Datos paciente.

En la siguiente gráfica se muestra un audiograma continuo de una persona con algunas deficiencias auditivas.

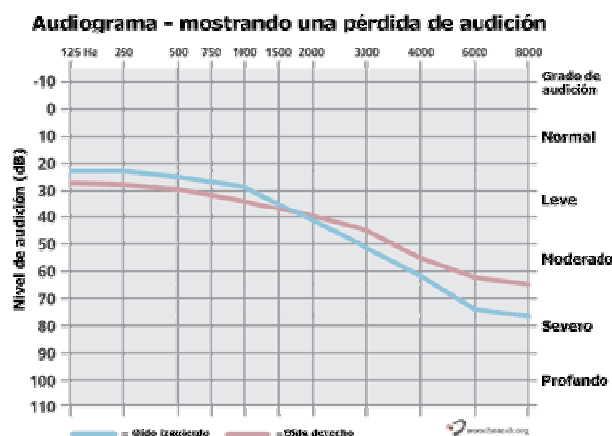


Figura 75. Audiograma con pérdidas de audición.

A pesar de que los niveles de intensidad normales para una persona sin ninguna discapacidad se encuentran en torno a los 20dBs, en la realización del proyecto se han estimado en 35-40 dBs. Esto se debe a las limitaciones del ordenador en cuanto a los altavoces que tiene integrados y a que los lugares donde se han realizado las pruebas no han sido insonorizados totalmente. Estos valores han sido contrastados con los audiogramas de algunos pacientes realizados en centros de audición.

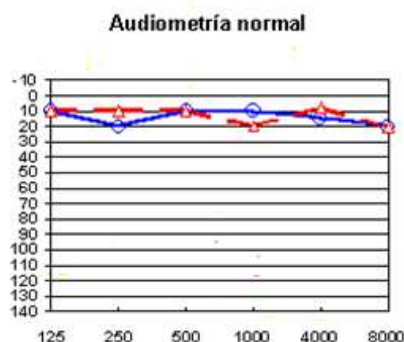


Figura 76. Audiograma normal.

Una vez que se ha realizado la audiometría, se necesita un estudio previo a la segunda fase de pruebas. Es imprescindible poder identificar una región o frecuencia de corte a partir de la cual el umbral de audibilidad es inferior a la normalidad. Por ejemplo, en el caso de la Figura 62 después de un primer análisis, se puede determinar que el oído derecho tiene mayor dificultad para percibir los sonidos en el rango de 500-4000Hz.

Cuanto más precisa es la estimación de la región muerta, mejores son los resultados que se obtienen en la realización de las pruebas. Por ello, es conveniente un estudio preliminar del audiograma para definir esta región.

A partir del audiograma, se puede distinguir la región muerta con deficiencias auditivas, el tipo de disfunción auditiva del paciente e incluso los fonemas que quizá el voluntario tenga posiblemente problemas para escuchar.

Después de esta primera fase de prueba se puede realizar otro cribado de los voluntarios, excluyendo aquellos que no presentan ninguna deficiencia auditiva que se pueda percibir en el audiograma. Posteriormente, se puede iniciar la segunda fase de pruebas.

5.2.3 Prueba verbal

Después de la fase de prueba tonal se realiza una audiometría verbal que tiene como objetivo determinar la comprensión de cada palabra, es decir, la capacidad de poder percibir e identificar cada palabra. Esta prueba es totalmente complementaria a la anterior, porque por ella misma no sirve para determinar ninguna deficiencia auditiva.

Esta prueba al igual que la anterior, es totalmente subjetiva porque depende de la respuesta de cada paciente. Por ello, es necesaria su colaboración y se confía en la veracidad de sus respuestas.

Para la realización de esta prueba se descartó la opción de leer las palabras para que los pacientes las repitieran, por la gran facilidad de labiolectura de la mayoría de los pacientes. Por esto, se desarrolla una aplicación para la realización de la audiometría verbal.

En el desarrollo de la aplicación se hicieron grabaciones con distintos timbres de voz femenina (niña, joven, mujer) y de voz masculina (joven, hombre) para poder extraer conclusiones sobre la inteligibilidad de las palabras según el timbre. Además, las palabras fueron elegidas fonéticamente, siguiendo los siguientes criterios: mismo número de sílabas, palabras sin dobles sentidos, de una única pronunciación, igualmente acentuadas y utilizando un vocabulario adaptado a la edad.

La inteligibilidad de las palabras en algunos casos depende del timbre de la voz, la pronunciación, incluso el acento. Después de esta fase de pruebas, se pueden obtener diversas conclusiones sobre la mejora de la inteligibilidad que se detallan en el capítulo 7. Conclusiones.

A continuación se muestra la lista de palabras que se utilizan en la aplicación para la realización de la prueba verbal:

Bota-boca /t/-/k/
Cera-ceda/r/-/d/
Pito-pico/i/-/a/
Pera-perra/r/-/r/
Peso-queso/p/-/k/
Gorro-corro/g/-/k/
Mano-mono/a/-/o/
Pilla-piña/l/-/n/
Mesa-misa/e/-/i/
Jota-gota/x/-/g/
Zumosumo/θ/-/s/
Plato-pato/pl/-/p/
Lana-luna/a/-/u/
Lobo-globo/l/-/gl/
Nada-nata/d/-/t/

Ropa-tropa/r/-/tr/
Mulo-muro/l/-/r/
Presa-fresa/pr/-/fr/
Nata-napa/t/-/p/
Puente-fuente/p/-/f/
Vaso-paso/s/-/s/
Pesos-besos/s/-/s/

Además se han realizado las grabaciones de forma individual y colectiva, es decir, una sola palabra y dos palabras, para la correcta identificación de los fonemas. La elección de las palabras que se solicita que repita el paciente, se basa en la identificación de la región con problemas de audición de la prueba anterior, con los fonemas que se encuentran en dicho rango de frecuencias [47].

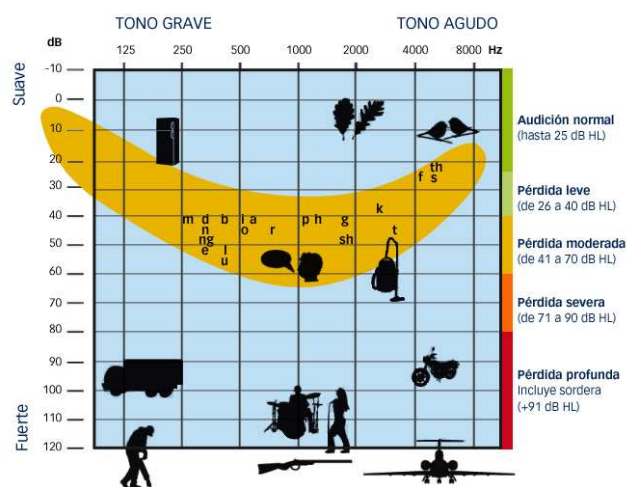


Figura 77. Identificación fonemas y frecuencias.

El modo de funcionamiento de la aplicación se explica a continuación:

1° Se colocan unos auriculares al paciente y otros a la persona que controla la audiometría. Es necesario comprobar el correcto acoplamiento de los auriculares y su posición (auricular derecho en oído derecho y auricular izquierdo en oído izquierdo) para que las pruebas se realicen de manera satisfactoria.

2° Se explican las instrucciones al paciente “Usted va a escuchar unas palabras por el oído izquierdo/derecho o ambos. Por favor repita lo que escuche.”

3° Seguidamente, se eligen las palabras que contienen fonemas que corresponden al rango de frecuencias que el paciente percibe con menor nivel de intensidad. Se presiona el ToggleButton de palabras, se elige la palabra en concreto y se presiona PLAY ORIGEN.

4° Se apuntan el porcentaje de aciertos, es decir, el porcentaje de palabras que el paciente repite adecuadamente. Normalmente, existen algunas palabras que el paciente no escucha con claridad o no sabe identificar.

5° Se repiten las palabras que no han sido escuchadas correctamente y se les aplican los diferentes métodos resolutivos para estimar otros parámetros variables como el volumen, nivel de amplificación o factor de compresión. Esto se lleva a cabo presionando el botón “Traslación Circular”, “Traslación Lineal”, “Amplifica” o “Escalado”. A base de ensayo y error, se consigue estimar dichas variables para utilizar los métodos resolución y que el paciente pueda escuchar e identificar mayor número de palabras.

6° Se apuntan los valores de las variables con las que se ha obtenido una mejora en el tanto por ciento de palabras identificadas correctamente para usarlos en la siguiente fase de pruebas.

Los valores de las variables son intrínsecos de cada paciente y cada método utilizado, por lo que es necesario realizar de forma independiente el estudio de dichos parámetros.

Una vez que se ha realizado la audiometría verbal, se puede utilizar el programa aplicación de este proyecto, con los valores de los parámetros estimados y utilizando frases como se comenta en el apartado siguiente. Por ejemplo, en el caso anterior, se puede utilizar el método amplifica con 20dBs como parámetro o el método estrecha/escala con un parámetro de 0.75.

Esta fase de pruebas sirve para estimar los parámetros como el nivel de amplificación y factor de escala que son apropiados para cada persona. Estos parámetros son estimados a partir de las opiniones subjetivas de cada paciente y una vez que se han definido dichos valores, se puede realizar la siguiente fase de pruebas para valorar cada uno de los métodos.

5.2.4 Aplicación programa

Después de la audiometría tonal y verbal, se puede realizar la fase de prueba de los diferentes métodos. Esta prueba es también subjetiva, porque depende totalmente de la opinión de los voluntarios.

Como ya se ha comentado en el apartado anterior, para poder utilizar de forma eficiente la aplicación, se debe haber estimado anteriormente el valor de los parámetros necesarios para la realización de cada uno de los métodos resolutivos.

Las frases que se han grabado para el desarrollo de la aplicación deben contener los mismos fonemas que los de las palabras de la fase anterior de pruebas. Además, se mantiene la diversidad de timbres de voz para la posterior obtención de conclusiones.

A continuación se muestra la lista de frases que se utilizan en la aplicación para la realización de la aplicación del programa:

- Dichosa edad y siglo dichoso.
- Pero esto importa poco a nuestro cuento.
- Tenía en su casa a una señora que pasaba de los sesenta.
- Fácilmente medirá unos setenta metros de ancho.
- Hasta la fecha, todos los resultados han tenido éxito.
- En un lugar de la Mancha.
- Faltan aquellas fresas frescas.
- Planeé llegar a la feria a tiempo.
- Como un sueño hace señas.
- Susana sabe silbar.
- Felipe felicita al farmacéutico.
- Es fácil firmar con flores.
- Los sábados seleccionados son festivos.
- Las margaritas amarillas son bonitas.
- Visitamos Zaragoza en dos días.
- Regala bondad y no la guerra.
- Abandona la zona de peligro.
- Ajusta la bandera al mástil.
- El ropero de Rosa está a rebosar.
- Votaremos al mejor diputado.
- En el zoo veo monos y orangutanes.
- Nadie del vecindario buscó madera.
- Los jabalíes no me gustan nada.
- Las hormigas y los canguros forman parte de la fauna.
- En el museo veo violetas.
- La miel es el zumo de las flores.
- Los gusanos maltratan los jardines.
- Los niños dibujaban por las mañanas.

En este caso se han incluido algunas frases que si se analizan bien, no tienen mucho sentido semántico para que los voluntarios no puedan reconstruir la frase con la información que han escuchado. El cerebro es capaz de reconstruir frases por sentido común, a pesar de no haberlas escuchado.

El modo de funcionamiento de la aplicación se explica a continuación:

1º Se colocan unos auriculares al paciente y otros a la persona que controla la audiometría. Es necesario comprobar el correcto acoplamiento de los auriculares y su posición (auricular derecho en oído derecho y auricular izquierdo en oído izquierdo) para que las pruebas se realicen de manera satisfactoria.

2º Se explican las instrucciones al paciente “Usted va a escuchar unas frases por el oído izquierdo/derecho o ambos. Por favor repita lo que escuche.”

3º Seguidamente, se eligen algunas frases presionando el ToggleButton de frases y se presiona PLAY ORIGEN.



Figura 78. Audiograma normal.

4° Se completan los parámetros variables estimados en la fase anterior para utilizar los métodos “Traslación Circular”, “Traslación Lineal”, “Amplifica” o “Escalado” presionando el botón adecuado en cada caso. En este caso, se puede obtener las siguientes conclusiones, a partir de las respuestas de los pacientes: oye algo pero no alcanza a reconocerlo, oye el sonido lo puede repetir pero no lo identifica con ningún significado, oye y comprende, no aplica o no encuentra mejora.

5° Para cada voluntario se realiza una puntuación sobre el método con el que se obtienen mejores resultados. Esto no es un proceso sencillo, puesto que cada paciente evalúa del 1 al 4 la inteligibilidad y mejora auditiva con cada método. De esta forma, se facilita la extracción de conclusiones posteriores. La idea es encontrar un compromiso entre la inteligibilidad y la mejora auditiva para cada método.

Por si las 29 frases grabadas en la aplicación del programa no fueran suficientes para el análisis de los diferentes métodos, en la aplicación existe un PushButton llamado “LOAD ARCHIVO LIBRE”, que puede cargar cualquier archivo de voz grabado previamente.

En el capítulo siguiente se detallan las conclusiones y los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a los voluntarios.

Capítulo 6

Resultados, evaluación y conclusiones

6.1 Introducción

En este capítulo se comentan los resultados obtenidos gracias a los voluntarios que realizan las pruebas que se detallan en el capítulo anterior 5. Diseño de las pruebas. También, se realiza una evaluación de los datos recogidos para obtener conclusiones y poder determinar cuál es el método con mejor compromiso entre calidad auditiva e inteligibilidad.

6.2 Resultados

En este capítulo se analizan las fichas de cada uno de los pacientes. Cada una de las fichas se ha completado a partir de las experiencias subjetivas de los voluntarios, por lo que es necesario confiar en la veracidad de las respuestas de cada paciente.

De los 70 voluntarios que se ofrecieron para la realización de las pruebas del proyecto, sólo 53 de ellos obtuvieron puntuaciones mayores de 12 puntos en el cuestionario preliminar. Tal y como se comentó, de esta forma se descartan 17 voluntarios que no son susceptibles en principio de padecer ninguna disfunción auditiva.

Para la posterior determinación de conclusiones, se ha analizado la edad de cada uno de los voluntarios consiguiendo la siguiente población muestral:

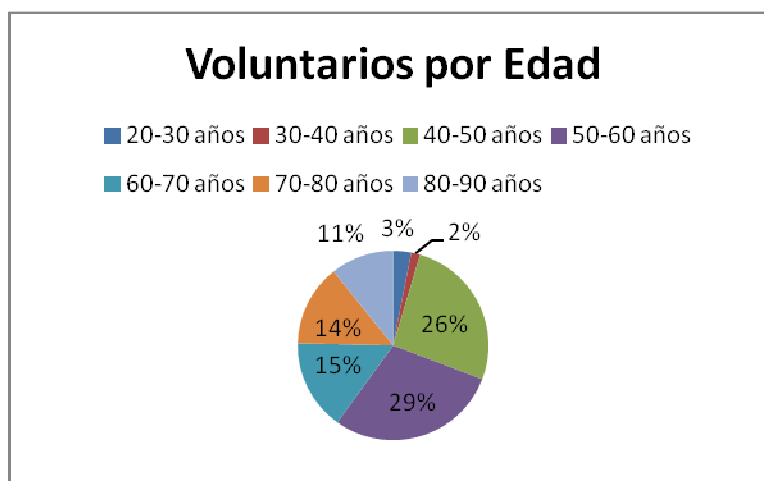


Figura 79. Población muestral.

A los 53 pacientes voluntarios signantes se les realiza las audiometrías tonal y verbal, obteniendo resultados como los que se observa en las fichas del ANEXO I.

A partir de las audiometrías tonales realizadas se puede clasificar la población muestral en función de las deficiencias auditivas que presentan:

- Audición normal.
- Disfunciones auditivas leves o moderadas.
- Disfunciones auditivas graves.
- Audiometrías de aspecto plano.

Para ello, se han establecido unos umbrales para determinar los diferentes niveles de pérdidas de audición. Las intensidades menores o iguales a 40 dBs presentan la audición de una persona normal, mientras que niveles de 40-60 dBs muestran pérdidas leves o moderadas y las superiores a 60 dBs, pérdidas graves y profundas.

A continuación, para cada uno de los casos anteriores se muestra un audiograma que ejemplifica cada uno de los casos. En primer lugar, se presentan los audiogramas de audición normal y pérdidas de audición leves.

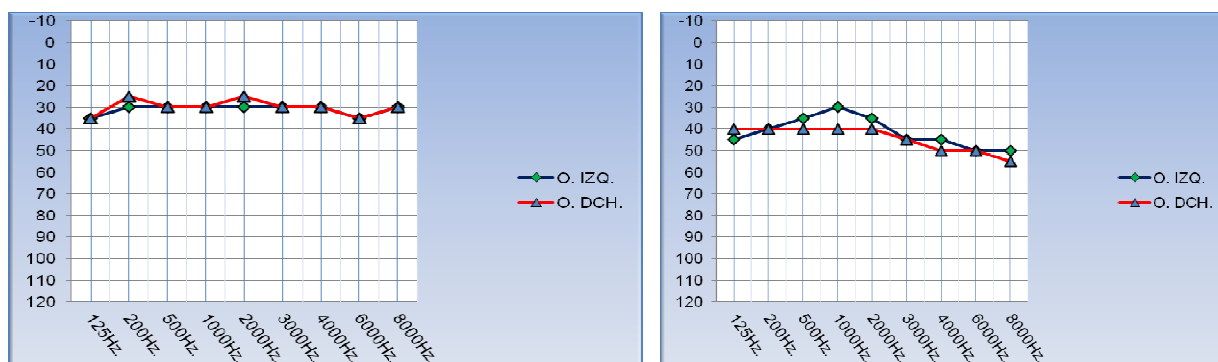


Figura 80 y 81. Audiograma normal y con pérdidas leves.

Posteriormente, se muestran los audiogramas obtenidos tras la fase de pruebas que muestran pacientes con disfunciones graves y con audiogramas planos.

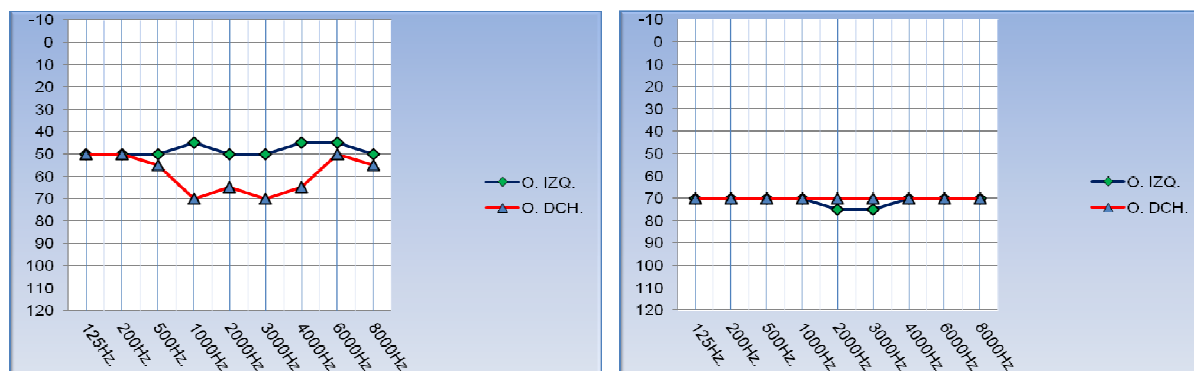


Figura 82 y 83. Audiograma con pérdidas graves y plano.

A partir de los resultados obtenidos, es evidente que es necesario realizar la audiometría verbal y la aplicación del programa de forma independiente para cada oído. Debido a que en el 94,34% de los casos estudiados, tienen diferentes audiogramas para cada uno de los oídos.

Por ejemplo, en la siguiente figura se muestra el audiograma de un paciente con deficiencia auditiva más grave para el oído derecho que para el oído izquierdo y otro que es igual para ambos oídos.

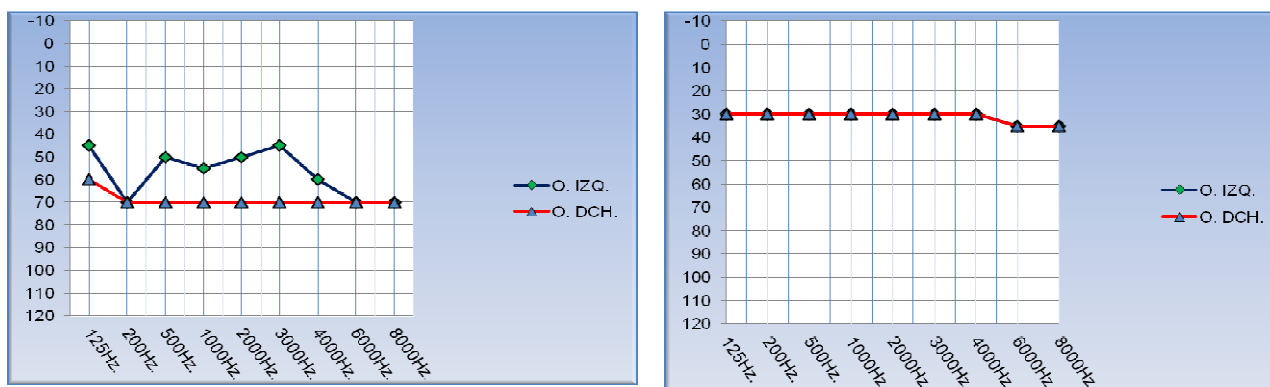


Figura 84 y 85. Audiograma diferente para el oído derecho e izquierdo e igual para ambos.

En la siguiente gráfica se puede observar los tipos de disfunciones auditivas de los 53 voluntarios.

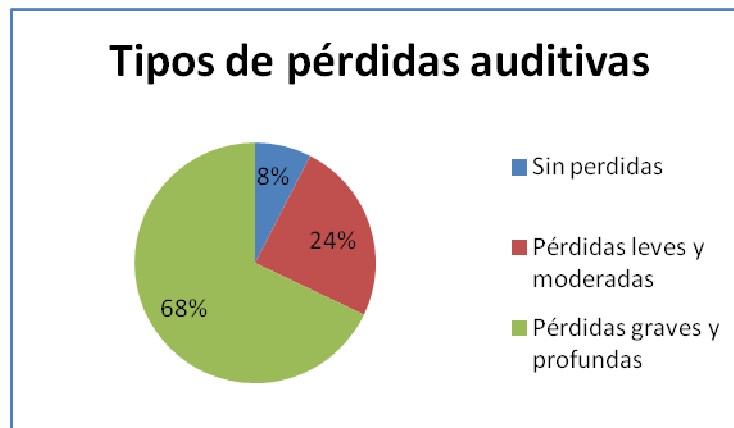


Figura 86. Porcentaje según el tipo de pérdidas de audición.

Se destaca que este porcentaje se ha obtenido a partir de la muestra poblacional que parece susceptible de padecer problemas de audición a partir del cuestionario preliminar. En ningún caso, este estudio es representativo de la población en general.

Al realizar las pruebas del programa aplicación a los voluntarios, se pueden clasificar sus respuestas en varios grupos:

- Encuentra una mejora (escucha y entiende).
- Encuentra una mejora (escucha pero no entiende).
- No encuentra mejora.
- No aplica (casos en los que no sea necesaria ningún método de mejora)

Al realizar las pruebas a las personas de la asociación CECUSOR, se encuentran pacientes que no han escuchado nunca los fonemas de las palabras, porque han aprendido el lenguaje de los signos para expresarse. Por lo que, encuentran gran dificultad para asociar los fonemas con el significado de la palabra, es decir, escuchan las palabras y son capaces de repetirlas pero no las entienden.

Uno de los casos que ejemplifican lo comentado anteriormente, es el caso del voluntario número 10. Éste es capaz de escuchar y repetir la palabra “perro” pero no la asocia con el significado de animal carnívoro doméstico.

Para conseguir entender este fenómeno, fue necesario recurrir a una pequeña tabla para poder comunicarse con algunos de los pacientes. También, se destaca la labor de una persona de la asociación que ayudó en la traducción del lenguaje de signos, para entender que los pacientes escuchaban pero no entendían las palabras hasta que se les traducían al lenguaje de los signos.

TABLA DEL ALFABETO DEL LENGUAJE DE SEÑAS									

* Las señas dibujadas en color oscuro muestran la letra del alfabeto correspondiente tal como se ven cuando las ejecuta una persona, frente a nosotros, con la mano derecha. Las señas dibujadas en color claro representan la misma letra que se encuentra a su izquierda pero vista desde otro ángulo; su único objetivo es el de aclarar la posición de los dedos o el movimiento de la mano.

Figura 87. Tabla simplificada del lenguaje de los signos.

Estos casos están por lo general, estrechamente relacionados con los voluntarios que padecen disfunciones auditivas graves. Son aquellos pacientes que han nacido con este tipo de deficiencias auditivas y han aprendido a comunicarse a partir de signos.

También, se han encontrado casos en los que los pacientes reproducían las frases porque las reconstruían por el contexto. Es decir, sólo eran capaces de oír algunas palabras y por intuición y contexto reconstruían el resto de la frase.

Un ejemplo de ello, es la frase “En el zoo veo monos y orangutanes” y el paciente número 44, que reconoce haber repetido la frase completa a pesar de sólo haber escuchado las palabras subrayadas.

“En el zoo veo monos y orangutanes”

Por ello, posteriormente se incluyen en el banco de frases de prueba, alguna frase sin sentido semántico.

Además, existen algunos pacientes que escuchan y entienden las palabras y frases sin utilizar ningún método de mejora, por lo que ninguno de los métodos aplican para esos pacientes. Normalmente, estos casos coinciden con los voluntarios que no se les diagnostica ninguna pérdida de audición o con algunas pérdidas leves.

A partir de todos los resultados obtenidos con las opiniones subjetivas de los voluntarios, se intenta simplificar todos los resultados obtenidos en una tabla con el objetivo de poder posteriormente extraer conclusiones.

	Traslación circular	Traslación lineal	Escalado	Amplifica	Escucha pero no entiende	No encuentra mejora	No aplica	Mujer	Hombre
Voluntario 1							X	X	
Voluntario 2							X		X
Voluntario 3							X	X	
Voluntario 4			X	X					X
Voluntario 5							X		X
Voluntario 6				X					X
Voluntario 7	X								X
Voluntario 8	X								X
Voluntario 9			X	X					X
Voluntario 10			X	X	X			X	
Voluntario 11			X	X	X				X
Voluntario 12						X		X	
Voluntario 13			X	X				X	
Voluntario 14					X				X
Voluntario 15					X			X	
Voluntario 16			X	X					X
Voluntario 17			X		X				X
Voluntario 18	X				X			X	
Voluntario 19	X								X
Voluntario 20		X							X
Voluntario 21				X				X	
Voluntario 22				X					X
Voluntario 23			X					X	

Voluntario 24			X	X					X
Voluntario 25	X								X
Voluntario 26			X	X				X	
Voluntario 27	X							X	
Voluntario 28			X	X	X			X	
Voluntario 29		X							X
Voluntario 30							X		X
Voluntario 31	X		X						X
Voluntario 32				X	X			X	
Voluntario 33							X		X
Voluntario 34			X						X
Voluntario 35							X	X	
Voluntario 36		X						X	
Voluntario 37				X					X
Voluntario 38							X		X
Voluntario 39							X	X	
Voluntario 40	X			X				X	
Voluntario 41					X			X	
Voluntario 42							X		X
Voluntario 43							X	X	
Voluntario 44	X			X				X	
Voluntario 45	X							X	
Voluntario 46				X				X	
Voluntario 47							X		X
Voluntario 48				X				X	
Voluntario 49							X	X	
Voluntario 50			X	X					X
Voluntario 51							X		X
Voluntario 53	X								X
Total	10	3	11	16	9	2	14	24	29

Tabla 12.Tabla resumen.

En el apartado siguiente, después de un estudio de los resultados que resume esta tabla se pueden extraer algunas conclusiones.

6.3 Conclusiones generales del proyecto

Los resultados de todas las pruebas realizadas se ven resumidas en la tabla del apartado anterior, a partir de la cual se pueden obtener conclusiones.

El principal objetivo de este proyecto es valorar los métodos resolución que mejoren la audición de la mayoría de los pacientes tanto en función de la calidad auditiva como en la inteligibilidad. Para ello, se contemplan todas las respuestas posibles de cada uno de los pacientes pudiendo elegir varios métodos como mejora, tal y como se muestra en el siguiente gráfico.

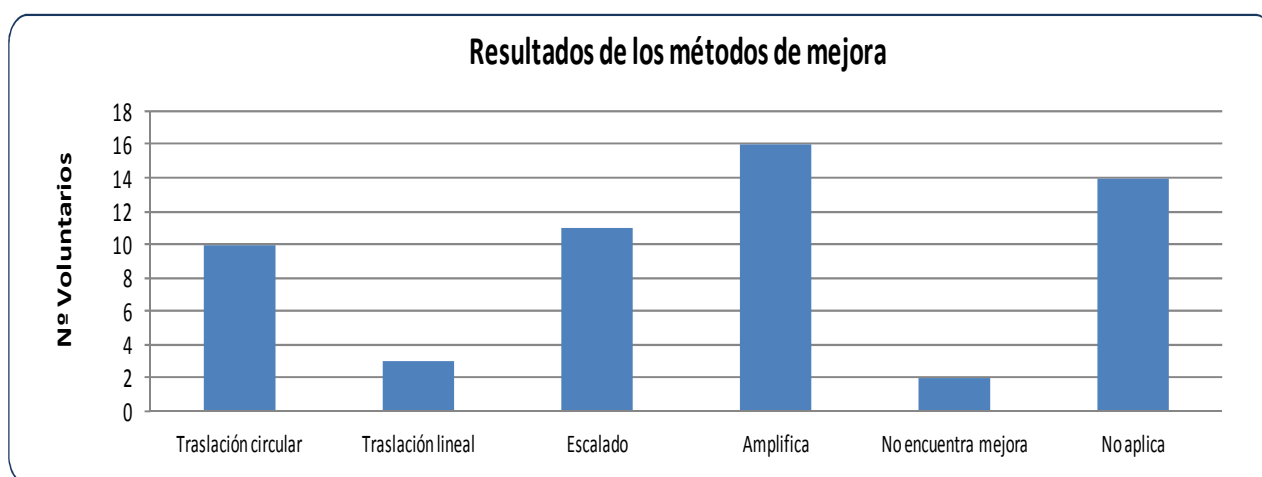


Figura 88 . Gráfica de Resultados por metodos.

A partir de la figura anterior, se puede extraer la conclusión que los métodos que consiguen una mayor percepción de mejora auditiva para los voluntarios es el “Amplifica” y el método “Escalado”. Los métodos que son menos eficientes según la opinión de los pacientes son el “Traslación Circular” y “Traslación Lineal”. Cabe destacar, que las conclusiones generales no tienen nada que ver con el caso concreto de cada paciente, puesto que aunque el método que mejor opinión consigue para la mayoría de los pacientes es el “Amplifica”, éste no es el que consigue la mejora auditiva para todos.

Gracias a la gráfica anterior, se puede concluir que en el caso de que algún método mejore la audición de los pacientes, el 40% de los voluntarios consideran que el método “Amplifica” es el mejor, seguido del 28% del método “Escalado”. El método “Traslación Circular” es el mejor para el 25% de los casos, mientras que para el 7% lo es el método “Traslación Lineal”.

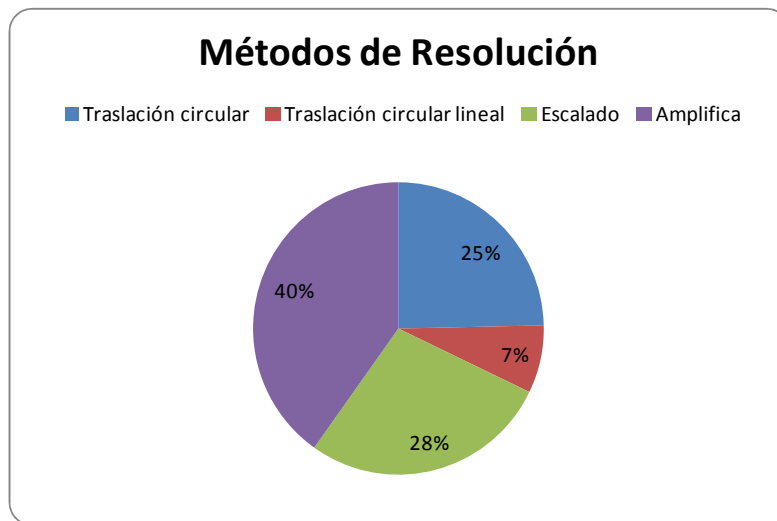


Figura 89. Gráfica de Resultados de los métodos con mejora.

Pero no en todos los casos, se obtienen mejoras con los métodos aplicados. Por eso, en la siguiente gráfica se muestra los principales motivos por los que ninguno de los métodos mejora notablemente la audición del paciente.



Figura 90. Gráfica de Resultados de los métodos sin mejora.

Tal y como se ha comentado en el apartado anterior, existe la posibilidad de que el paciente escuche pero no sea capaz de identificar el fonema o que simplemente no encuentre mejora con ninguno de los métodos aplicados. Se puede concluir a partir del gráfico anterior, que la mitad (56%) de los intentos fallidos de mejora auditiva, son debidos a no entender los fonemas y una minoría (8%) no percibe ninguna mejora. El resto de pacientes (36%) no necesitan ninguna mejora auditiva, porque escuchan las palabras correctamente sin aplicar ninguno de los métodos.

Debido al fenómeno comentado anteriormente, existen pacientes que escuchan pero no entienden, pero aún así encuentran mejoras con algunos métodos. En la siguiente gráfica se muestran los siguientes casos.

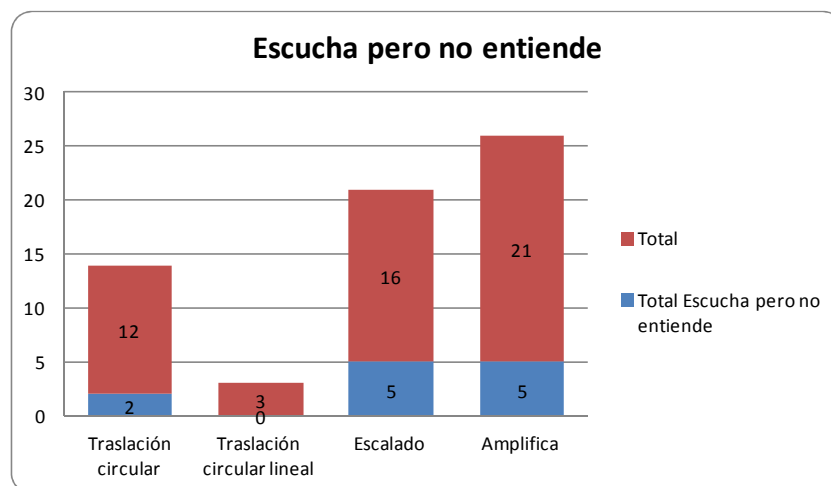


Figura 91. Gráfica de Métodos de escucha pero no entiende.

A partir de la gráfica anterior se puede comentar el porcentaje de pacientes que aunque mejoran su audición con algunos de los métodos, no consiguen asociar los fonemas a las palabras.

	Traslación Circular	Traslación Lineal	Escalado	Amplifica
Porcentaje No asocia	16,67%	0,00%	31,25%	23,81%

Tabla 13. Tabla resumen Escucha pero no entiende fonemas.

La mayoría de los casos en los que el paciente es incapaz de asociar las palabras con su significado, la inteligibilidad mejoraría con un proceso de aprendizaje basado en pruebas para educar el oído a los nuevos fonemas.

Debido a la diversidad de patologías de los pacientes, se ha puesto de manifiesto que algunos de los pacientes, como por ejemplo el voluntario 6, presenta dificultades para discernir las palabras del banco de voces femeninas. Este fenómeno no se ha estudiado en profundidad, pero se hace referencia a él en varias ocasiones.

Las disfunciones objetivo de este proyecto son más características en personas de edad avanzada, aunque existen excepciones, por esta razón se realiza una clasificación en función de la edad en la siguiente gráfica.

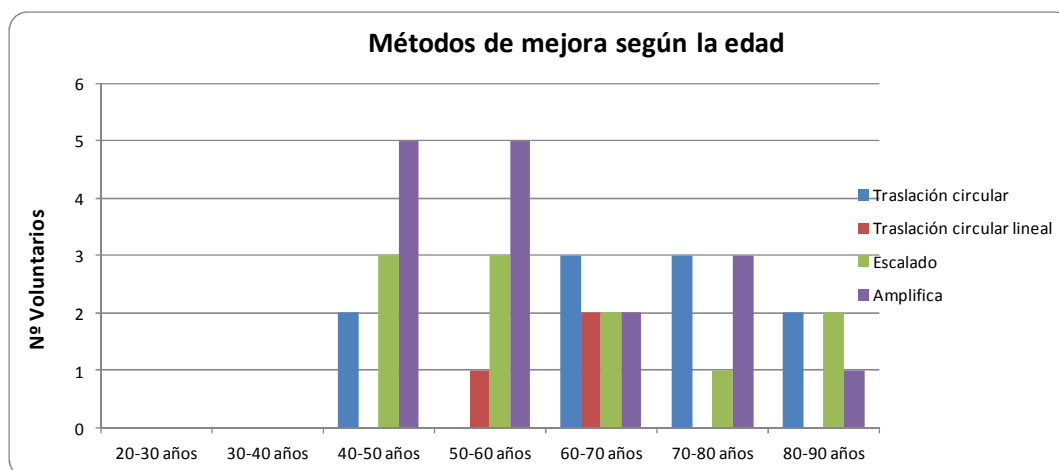


Figura 92. Gráfica de Métodos de mejora en función de la edad.

Tras el análisis de los métodos de mejora en función de la edad, se puede concluir que las personas en el rango de edad de 40-50 años consiguen una clasificación de métodos de mejora diferentes que para otro rango de edad. Es curioso analizar que en función del aumento de edad las diferencias entre los métodos disminuyen, debido a que no son capaces de discriminar tan minuciosamente, como personas más jóvenes, las mejoras auditivas en función de los dos criterios de estudio: calidad e inteligibilidad.

A partir del último análisis, se puede concluir que las personas hasta los 60 años aproximadamente, obtienen mejoras auditivas más importantes con los métodos del proyecto.

Debido a que la presbiacusia es más común en personas del sexo masculino, se decide realizar un estudio diferenciando los métodos de las mejoras auditivas en función del sexo.

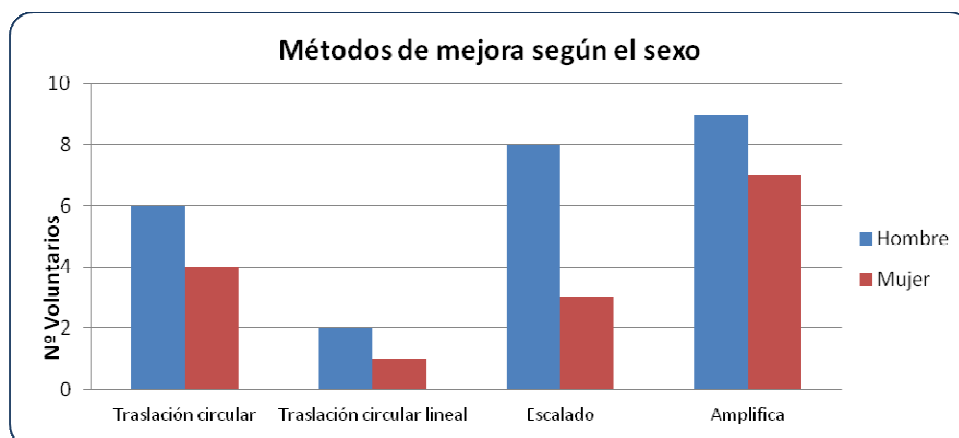


Figura 93. Gráfica de Métodos de mejora en función del sexo.

Es interesante observar como para cada método existen diferencias entre el sexo femenino y masculino, teniendo en cuenta que el número total de pacientes del sexo femenino es 24 y del sexo masculino 29.

La conclusión que se puede obtener entre los dos sexos, es la diferencia en el orden de mejora de los métodos. Para los hombres se obtiene mejor resultado utilizando los métodos en el siguiente orden: “Amplifica”, “Escalado”, “Traslación” y “Traslación Lineal” . Mientras que para las mujeres, el orden es el siguiente: “Amplifica”, “Traslación Circular”, “Escalado” y “Traslación Lineal”. Esto puede ser debido a que la pérdida de audición de las frecuencias agudas es más común en los hombres que en las mujeres.

Aunque el objetivo principal del proyecto es encontrar una mejora en la audición, es relevante compaginar la mejora de la calidad auditiva con la mejora de la inteligibilidad. Una mejora en la calidad de la señal no consigue buenos resultados si el paciente no es capaz de entender las palabras debido al ruido u otros efectos indeseados. A veces, se encuentran casos en los que el paciente es incapaz de repetir correctamente la palabra de prueba, aunque la calidad del sonido es buena según sus valoraciones. En cambio con otros métodos, es capaz de discernir palabras a pesar de que la calidad de la señal no es tan buena.

Para el análisis final de cada método, se requiere que cada voluntario puntúe con un valor del 1 al 4 la mejora auditiva y la inteligibilidad de cada método, consiguiendo los siguientes resultados.

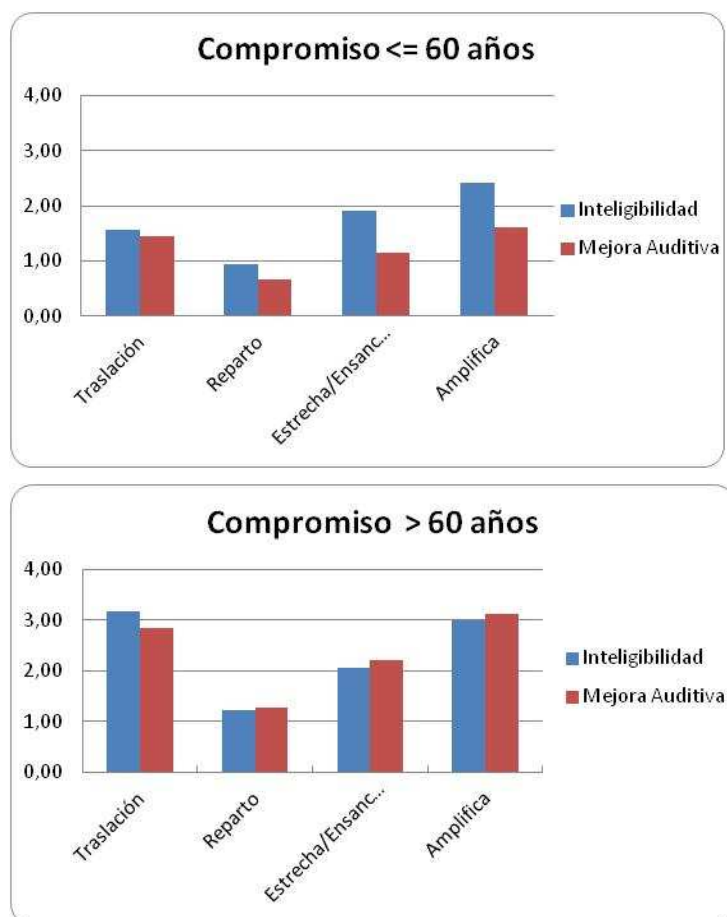


Figura 94 y 95. Gráficas del compromiso entre la calidad y la inteligibilidad.

Se han realizado dos estudios diferentes según la edad de la población debido a que, los pacientes con más de 60 años no son capaces de cuantificar de forma tan eficiente las mejoras de cada método, en función a la calidad e inteligibilidad.

El orden que los pacientes hasta 60 años inclusive ha elegido en función de la calidad auditiva es: “Amplifica”, “Traslación Circular”, “Escalado” y “Traslación Lineal”. Este orden cambia si el requisito es la inteligibilidad: “Amplifica”, “Escalado” “Traslación Circular” y “Traslación Lineal”.

En cambio si se estudia a los pacientes de más de 60 años, el orden de los métodos que eligen en función de la calidad e inteligibilidad es el mismo: “Amplifica”, “Traslación Circular”, “Escalado” y “Traslación Lineal”.

Los resultados obtenidos referentes a la inteligibilidad pueden ser mejorados, si se realizan fases de entrenamiento con los pacientes para que el oído se acostumbre a distinguir nuevos fonemas. De esta forma, los diferentes métodos mejorarían sus prestaciones.

Como conclusión, la elección del método de mejora que se debe utilizar para cada persona, requiere un estudio individual e intensivo de cada caso. Porque, a pesar de obtener conclusiones claras para el rango de edad, sexo y tipo de disfunción auditiva, la última palabra la tiene cada paciente. Con las conclusiones obtenidas en este proyecto, se puede determinar de forma previa el método que posiblemente obtenga la mejor pareja (calidad- inteligibilidad). Pero en ninguno de los casos, esta elección previa será la más óptima, debido a la diversidad de patologías de los voluntarios.

En general y para concluir, en el 62% de los casos, se han encontrado mejoras notables al aplicar alguno de los métodos. Por lo que, el objetivo del proyecto se ha cumplido para más de la mitad de los casos, tal y como se muestra en la siguiente gráfica.

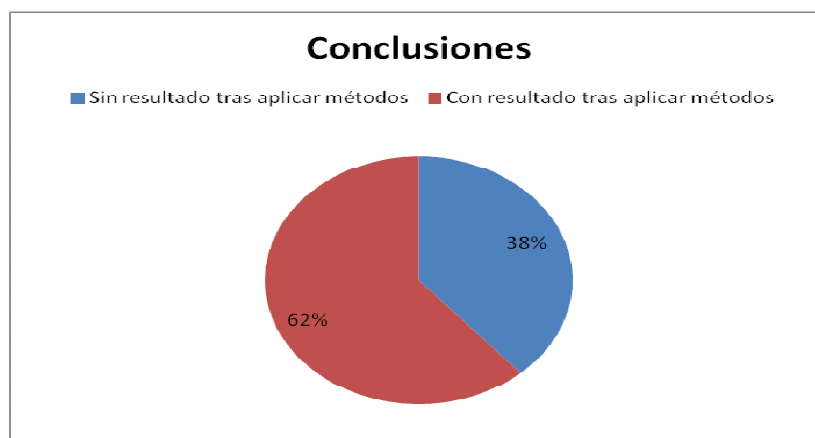


Figura 96. Gráfica de Resultados de los métodos mejora.

6.4 Líneas futuras

En este proyecto se han implementado varios métodos, cuyo principal objetivo ha sido evaluar de forma sencilla y preliminar si la audición de los pacientes mejora al aplicarlos. Pero, tal y como se comentó en el capítulo 3.3.2. Técnicas de los módulos elegidos, existen diversas estrategias posibles para intentar mejorar la audición.

En el futuro se pueden desarrollar multitud de técnicas que tengan en cuenta detalles como la descomposición de la señal en diversos niveles para detectar y eliminar el ruido, la definición de forma más precisa y de forma automática de los parámetros como el factor de compresión, el nivel de amplificación. Además, se propone la posibilidad de eliminar los chasquidos y ecos de las señales, etc.

Debido a que los métodos aplicados individualmente obtienen resultados positivos, una buena opción en el futuro es el desarrollo de métodos que fusionen la traslación circular y el escalado del espectro para obtener mejoras auditivas puesto que actualmente en el mercado no existen tratamientos comerciales para algunas patologías.

En este proyecto se comenta que es posible una mejora de la inteligibilidad de los pacientes, a partir de fases de entrenamiento para educar el oído a nuevos fonemas. Se propone en investigaciones posteriores, analizar los resultados obtenidos con los métodos definidos tras realizar sesiones de entrenamiento.

Para evitar los problemas en la estimación de la región de frecuencias muertas, en trabajos posteriores se propone la implementación de un programa que determine de forma automática la región con deficiencias auditivas a partir del audiograma. Además, se propone realizar un estudio referente a la calibración de cada uno de los elementos técnicos utilizados, para mejorar las prestaciones de las pruebas realizadas.

Incluso, otra de las líneas de investigación que se pueden desarrollar más adelante es la viabilidad de la implementación de estas mejoras en otros dispositivos como en teléfonos móviles, ordenadores portátiles, televisiones, etc. De esta forma, una vez que el método de mejora esté detectado se pueda incluir en otros dispositivos electrónicos para la mejora personalizada de la audición de cada paciente.

Capítulo 7

Planificación y presupuesto

7.1 Introducción

En este capítulo se realiza una breve descripción de las fases de desarrollo de proyecto y se muestra el presupuesto, calculado a partir de los costes de los recursos materiales y humanos que se han utilizado.

7.2 Planificación

El desarrollo del proyecto ha conllevado varias fases de aprendizaje que han sido fundamentales para el avance del proyecto. Una vez que se conocían las principales disfunciones auditivas, el proyecto comprende varias fases de implementación hasta la finalización del proyecto. Además, la realización de este proyecto se ha compaginado con la vida laboral a tiempo parcial y completo, según los diferentes periodos de la realización del presente proyecto.

A continuación se explican las diferentes fases del proyecto:

En un primer lugar se realizó un estudio general del proyecto, para decidir el verdadero objetivo del proyecto, los problemas que se intentan solucionar y la población

objetivo del proyecto. Para ello, se llevó a cabo una labor de investigación acerca de las diferentes disfunciones auditivas y los problemas sin resolver que existen respecto a estas deficiencias auditivas. El objetivo de esta fase consistía en familiarizarse con los problemas auditivos e identificar el objetivo del proyecto.

Una vez que se tenía una idea sobre las ideas principales del proyecto, se realizó una fase de contextualización, en la que se elaboró un análisis de requerimientos y un análisis de procedimientos.

En el análisis de requerimientos, se procedió a estudiar las herramientas hardware que iban a ser necesarias para el proyecto, como el ordenador, varios pares de cascos, etc. Además, se analizaron las herramientas de desarrollo que podían ser de ayuda para la implementación de los módulos del estudio, es decir, se valoraron los diferentes niveles de lenguaje de programación. Posteriormente, en la fase de contextualización se investigó sobre los estudios realizados referentes a las disfunciones auditivas hasta la actualidad, sus ventajas e inconvenientes, para obtener un conocimiento general sobre el tema. También, se estudiaron las pruebas que se realizan para obtener una idea de los problemas auditivos de las personas objeto del proyecto. Para esto, se llevó a cabo un análisis de las condiciones y características necesarias, para el desarrollo de dichas pruebas.

En el análisis de procedimientos, se elaboró un estudio sobre los diferentes niveles de programación y una posterior discusión del más adecuado para el desarrollo del proyecto. De forma similar, se comentaron las ventajas e inconvenientes de los lenguajes de programación y se decidieron los más convenientes para este proyecto.

Para terminar el estado del arte, se realizó un estudio sobre las condiciones auditivas del ser humano y los problemas auditivos de forma más exhaustiva. Además, se estudiaron las posibles pruebas que determinan las deficiencias auditivas y la forma de obtener la población muestral adecuada.

Posteriormente, se comenzó la fase de desarrollo de procedimientos en la que se llevó a cabo de forma práctica, la elección del lenguaje más apropiado para este proyecto, debido a la facilidad de representación de las señales y las librerías de MATLAB. También, se investigó sobre las características de la voz y el audio y los conceptos básicos de la audición. Además, se comentaron las principales características del procesamiento de la señal de voz, para obtener los parámetros de trabajo adecuados. Para ello, se elaboró una investigación sobre la población tanto con disfunciones auditivas como sin ellas. De esta forma, se obtuvieron las características que son discriminantes entre ambos grupos.

Otra fase del proyecto, es la implementación de los diferentes módulos elegidos como posibles soluciones a los problemas de audición. Para ello, se elaboraron cuatro métodos que procesaban de diferentes maneras la señal de voz. Esta fase no se dio por finalizada hasta varias modificaciones posteriores, que implicaban una mejora en la eficacia y en el proceso de la implementación del código.

Después, se llevó a cabo la implementación de varias interfaces gráficas para la realización de las pruebas a la población elegida. Una aplicación para la realización de una audiometría tonal y otra aplicación para la audiometría verbal y las pruebas de los

diferentes métodos. Esta fase tuvo varias mejoras para realizar las interfaces gráficas con un funcionamiento más intuitivo respecto a una primera versión realizada.

La fase más práctica del proyecto consistió en la realización de las pruebas en la asociación CECUSOR durante varios días y en la anotación de los resultados de cada voluntario. Esta fase se vio demorada por la búsqueda de la asociación que permitiera la realización de las pruebas y posteriormente, por la disponibilidad de la asociación elegida. Dicha asociación tiene programadas diferentes actividades por las tardes, por lo que sólo tenían disponibilidad un día a la semana para temas referentes a las pruebas necesarias.

Para concluir, se elaboró la memoria resumen con todos los contenidos anteriormente comentados y las conclusiones y resultados obtenidos, Además se completó con una presentación resumen del ciclo de vida del proyecto y las deducciones obtenidas.

En el Anexo IV se adjunta un diagrama Gantt realizado para la ayuda de la planificación de este proyecto.

7.3 Presupuesto

Para el cálculo del presupuesto del proyecto, se ha tenido en cuenta la plantilla que propone la Universidad Carlos III de Madrid [49].

El presupuesto se desglosa en varios tipos de costes, los costes directos y los costes indirectos.

7.3.1 Costes directos

Los costes directos a su vez, incluyen los referentes al material necesario para el proyecto como los costes debidos al personal necesario para el desarrollo.

A continuación se muestra un desglose de los costes directos debidos al personal:

Apellidos y nombre	N.I.F. (no rellenar - solo a título informativo)	Categoría	Dedicación (hombres mes) ^{a)}	Coste hombre mes	Coste (Euro)	Firma de conformidad
Bousoño, Carlos		Ingeniero Senior	0,4	4.289,54	1.715,82	
Ramírez		Ingeniero	13,2	2.694,39	35.565,95	
Castaño, Laura						
Hombres			mes 13,6	Total	37.281,76	

Tabla 14. Tabla costes directos personal.

Para calcular los costes directos debidos al personal se han utilizado las indicaciones de la plantilla del presupuesto. Por lo que, la dedicación de cada persona se mide en hombres-mes y cada hombre-mes equivale a 131,25 horas de trabajo.

Seguidamente, se muestran los costes derivados de los equipos, teniendo en cuenta la amortización de cada uno de los equipos, que se calcula a partir de la siguiente fórmula.

$$\frac{A}{B} \times C \times D$$

Siendo:

A: nº de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es utilizado.

B: periodo de depreciación (60 meses)

C: coste del equipo (sin IVA)

D: % del uso que se dedica al proyecto (habitualmente el 100%) $\frac{A}{B} \times C \times D$

Descripción	Coste (Euro)	% Uso dedicado proyecto	Dedicación (meses)	Periodo de depreciación	Coste imputable ^{d)}
Ordenador portátil Toshiba	845,00	70	21	60	207,03
Auriculares Senheiser	49,00	100	14	60	11,43
Auriculares Philips	30,00	100	9	60	4,50
Audio Splitter jack	11,00	100	9	60	1,65
Total					224,61

Tabla 15. Tabla costes directos equipos.

En la tabla anterior se especifican los costes del hardware sin IVA y teniendo en cuenta la amortización de los mismos, según la plantilla del presupuesto.

Los costes del software incluyen los costes de las licencias necesarias para la realización del proyecto, que se detallan en la siguiente tabla.

Descripción	Costes imputable
Microsoft Office Word 2007	13,06
Microsoft Office Excel 2007	21,39
Microsoft Project 2007	22,98
Licencia Matlab	65,53
Total	122,96

Tabla 16. Tabla costes directos software.

7.3.2 Costes indirectos

Para contabilizar los gastos totales del proyecto, es necesario tener en cuenta los gastos indirectos, que no se pueden contabilizar a ninguna actividad en concreto. Por ejemplo, el gasto eléctrico de la luz, la calefacción, la conexión a Internet, etc. Estos gastos se contabilizan como un 20% del presupuesto total siguiendo las indicaciones de la plantilla del presupuesto.

7.3.3 Costes totales

Para obtener el presupuesto total, se analizan los costes directos debidos a los materiales, al personal y los costes indirectos. En la siguiente tabla se muestra el total del presupuesto.

Presupuesto Costes Totales	Presupuesto Costes Totales
Personal	37.282
Amortización	225
Subcontratación de tareas	0
Costes de funcionamiento	123
Costes Indirectos	7.526
Total	45.155

Tabla 17. Tabla costes totales.

El presupuesto total del proyecto asciende a un valor de 45,155€.

Referencias

- [1] **Miyara, Federico.** La Voz Humana. [En línea] [Citado en Enero 2012]
<http://www.fceia.unr.edu.ar/prodivoz/fonatorio.pdf>
- [2] **Camino Rentería, María Jesús.** La Voz Humana. [En línea][Citado en Marzo 2012]
<http://mariajesusmusica.files.wordpress.com/2008/11/lavoz.pdf>
- [3] **Aytotarifa.com.** Constitución de las palabras: sonidos, fonemas y letras. [En línea][Citado en Marzo 2012]
<http://www.aytotarifa.com/Aula%20abierta/Lengua%20Castellana/signolin.pdf>
- [4] **Tipler, Paul A.** Física para la ciencia y la tecnología. Parte 2: Oscilaciones y ondas. (Cuarta Edición. Editorial Reverté. Año 2000)
- [5] **National Academies.** Artículo de Robert Finn, A. James Hudspeth, Jozef Zwislocki, Eric Young, y Michael Merzenich. "Beyond Discovery: The Path from Research to Human Benefit". [En línea][Citado en Enero 2012]
http://www7.nationalacademies.org/spanishbeyonddiscovery/Sonido%20desde%20el%20silencio_%20el%20desarrollo%20de%20los%20implantes%20cocleares.html
- [6] **Kalipea.com.** El oído humano. [En línea][Citado en Enero 2012]
www.kalipedia.com/ciencias-vida/tema/relacion-coordinacion/graficos-transmision-vibracion.html?x1=20070417klpcnavid_147.Ees&x=20070417klpcnavid_184.Kes&ap=1&x2=20070417klpcnavid_183

[7] **Perez Vega, Constantino.** Sonido y audición. [En línea][Citado en Diciembre 2011]
<http://personales.unican.es/perezvr/pdf/Sonido%20y%20Audicion.pdf>

[8] **Beranek, Leo L.** Acoustics. (McGraw Hill Book Co. Inc. 1954)

[9] **Phonak.com.**[En línea][Citado en Enero 2012]
http://www.phonak.com/es/b2c/es/hearing/understanding_hearingloss/facts_and_figures.html

[10] **Audifono.net.** Noticias.[En línea][Citado en Enero 2012]

http://www.audifono.net/index.php?option=com_content&view=category&id=15&layout=blog&Itemid=4&limit=9&lang=es%3F5208f200&limitstart=80&date=2013-02-01

[11] **Isover.net.**Revista de sección Tecnológica. El Deterioro del Oído.[En línea][Citado en Enero 2012]

www.isover.net/asesoria/revista_club/018/secciontec.pdf

[12] **Widex.com.** [En línea][Citado en Febrero 2012]

<http://www.widex.es>

[13] **Arco, José L y Fernandez, Antonio.** Necesidades educativas especiales. Páginas 277-321 (Mc Graw Hill, 2004)

[14] **TeensHealth.org.**[En línea][Citado en Febrero 2012]
http://kidshealth.org/teen/en_espanol/enfermedades/hearing_impairment_esp.html

[15] **Orl.gaes.** [En línea][Citado en Marzo 2012]
http://www.orl.gaes.es/rcs_gene/pdf/cap22_presbiacusia.pdf

[16] **Hoodhill V.** Presbiacusia. El oído. Páginas 731-742 (Ed.Salvat, 1986)

[17] **Perez, Jesús y Salvador, Eduardo.** NTP366:Envejecimiento y trabajo:audición y motricidad.[En línea][Citado en Abril 2012]

http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_366.pdf

[18] **Dr. Yankel Pasik y Dr. David Pascoe.** "Audioprótesis. Enfoque médico, fonoaudilógico y electroacústico"Capítulo 1. (Ed. El Ateneo, Segunda edición, Año 2000)

[19] **Berger, K.W.** *The Hearing Aid: Its Operation and Development* (Tercera edición, Año1984). National Hearing Aid Society

[20] **Rizer, F.M.** Overlay Versus Underlay Tympanoplasty. Part 1: Historical Review of the Literature. *The Laryngoscope* 1970.

[21] **Pollack, M.C.** *Amplification for the Hearing-Impaired* (Tercera edición, Año 1988).

[22] **Weinkove, Robert.** *Aids to Hearing: From Julius Caesar to Julius Lempert.* [En línea][Citado en Enero 2012]

<http://www.medicalindexing.co.uk/rob/hearing/hearing.htm>

[23] **Moore, B.** Dead regions in the cochlea: conceptual foundations, diagnosis, and clinical applications. Páginas 98-116 (Ear Hear, Año 2004).

[24] **Avrson.com.** [En línea][Citado en Enero 2012]

www.avrson.com/An_Alternative_Use_for_BTE_FM_Listening_Systems.pdf

[25] **Widex.Com.** Nuestros beneficios Diferenciales. [En línea][Citado en Noviembre 2011]

<http://www.widex.es/tecnologia.php>

[26] **Nelson, P., and Revoile, S.** Detection of spectral peaks in noise: Effects of hearing loss and frequency regions. (J. Acoust. Soc. Am, Año 1998)

[27] **Kuk F, Ludvigsen C.** Amplification Management 101: Understanding variables. Páginas 22-32. (The Hearing Review, Año 2002)

[28] **Phonak.com.** [En línea][Citado en Noviembre 2011]

http://www.phonak.com/es/b2c/es/multiused_content/hearing_solutions/hearing_instruments/features-spice/soundrecover/soundrecover-detailpage.html

[29] **Oppenheim, A. V, Schafer, A. V.** Discrete Time Signal Processing. (Prentice Hall, Englewood Cliffs, Año 1989).

[30] **Rufiner, H L.** Análisis y modelado digital de la voz. Técnicas recientes y aplicaciones (Ediciones UNL, Año 2009)

[31] **Sajedur Rahman.** Pitch shifting of voices in real-time (Faculty of Engineering University of Victoria, Año 2007)

[32] Pitch Invariant Frequency Lowering with Nonuniform Spectral Compression, in Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing Páginas 121-124. (IEEE, New York). [En línea][Citado en noviembre 2011]

http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1171344&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D1171344

[33] **Reed, C. M., Hicks, B. L, Braida, L. D. and Durlach, N.L.** Discrimination of speech processed by lowpass filtering and pitch-invariant frequency lowering. Páginas 409-419. (J. Acoust Soc. Am., Año 1983)

[34] **McAulay, R. J., and Quateri, T. F.** Speech analysis/synthesis based on a sinusoidal Representation. Página 744-754 (EEE Trans. Acoust. Speech and Sig., ASSP-34, N 4)

[35] **C. M. Aguilera Mutioz, Peggy B. Nelson, Janet C. Rutledge and A. Gaga.** Frequency lowering processing for listeners with significant hearing loss.[En línea][Citado en Noviembre 2011]
<http://www.eurasip.org/Proceedings/Ext/NSIP99/Nsip99/papers/99.pdf>

[36] **Sanchez Morillo, Daniel.** Tesis Doctoral: Procesado y transmisión de señales biomédicas para el diagnóstico de trastornos y enfermedades del sueño.[En línea][Citado en Enero 2012]
minerva.uca.es/publicaciones/asp/docs/tesis/DSanchezMorillo.pdf

[37] **Alzate Castaño, Ricardo.** Estimación de contornos de pitch en línea sobre DSP.[En línea][Citado en Enero 2012]
http://wpage.unina.it/r.alzate/Support_files/BSc.pdf

[38] **Juarez Segura, David.** Tesis Doctoral: Eliminación del ruido en señales radar utilizando traslación.[En línea][Citado en Diciembre 2011]
<http://itzamna.bnct.ipn.mx:8080/dspace/bitstream/123456789/58/1/TesisDavidJuarezSegura.pdf>

[39] **Armada Dorda, Luis.** Modelo psicoacústico de enmascaramiento para implantes Cocleares.[En línea][Citado en Febrero 2012]
<http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/113/1/pfc1867.pdf>

[40] **Mendez, Justo.** Monografía: Lenguajes de programación. [En línea][Citado en Abril 2012]
<http://www.mitecnologico.com/Main/NivelesLenguajesDeProgramacion>

[41] **Álvarez, Sara.** Artículo:Lenguajes de programación. [En línea][Citado en Junio 2011]
<http://www.desarrolloweb.com/articulos/2358.php>

[42] **Salas Ayape, A.** Lenguaje de programación en Pascal. [En línea][Citado en Mayo 2011]
<http://www.unizar.es/sicuz/siscen/doc/ccuz19.pdf>

[43] **Kenneth C. Louden.**Lenguajes de programación: Principios y práctica. (Editorial Thomson , Año 2004).

[44] **King, Joe,** Matlab 6 for Engineers. (Editorial Hands-On Tutorial, Año 2006).

- [45] **Lehnhardt, Ernst.** Práctica de Audiometría.(Editorial Medica Panamericana, Año 1992).
- [46] **Moliné Marco, José Luis.** Audiometría tonal liminar: vía ósea y enmascaramiento. (Centro Nacional de condiciones de trabajo, Año 2007)
- [47] **Perelló, J.** Exploración Audiofoniátrica. (Ed. Científica médica, Año 1980).
- [48] **Alcina, J. y Blecua, J. M.** Frecuencia de fonemas en español. Gramática española. Páginas 430-435. (Editorial Ariel, Año 975)
- [49] **Uc3m.es.** Plantilla del presupuesto.[En línea][Citado en Septiembre 2012]
http://www.uc3m.es/portal/page/portal/administracion_campus_leganes_est_cg/proyecto_fin_carrera
- [50] **Zölder, Udo.** Digital Audio signal processing. (Editorial: John Wiley & Sons, 1997)
- [51] **Furui, Sadaoki.** Digital speech processing, synthesis and recognition. (Editorial: Marcel Dekker, 2001)
- [52] **Zetina, Ángel.** Electrónica básica(Editorial:Limusa S.A, 2004 México) Página:169 principios de acústica.

Anexo I

Cuestionario

Nombre: _____

Edad: _____

Sexo: _____

1. ¿Con frecuencia pide a los demás que repitan lo que dicen?

☐ Sí

☐ A veces

☐ No

2. ¿Le resulta difícil participar en las conversaciones en reuniones?

☐ Sí

☐ A veces

☐ No

3. ¿Tiene dificultades para entender una conversación por teléfono?

- ☐ Sí
- ☐ A veces
- ☐ No

5. ¿Tiene problemas para oír la televisión?

- ☐ Siempre
- ☐ A veces
- ☐ Nunca

6. ¿Alguna persona se ha quejado de que pone el volumen de la televisión demasiado alto?

- ☐ Sí
- ☐ A veces
- ☐ No

7. ¿Le cuesta entender a las personas en entornos ruidosos?

- ☐ Siempre
- ☐ A veces
- ☐ Nunca

8. ¿Tiene problemas para oír a distancia?

- ☐ Siempre
- ☐ A veces
- ☐ Nunca

9. ¿Se siente cansado cuando tiene que estar escuchando algo durante un periodo largo de tiempo?

- ☐ Siempre
- ☐ A veces
- ☐ Nunca

10. ¿Le resulta difícil identificar la procedencia del sonido?

- ☐ Siempre
- ☐ A veces
- ☐ Nunca

11. ¿Confunde algún sonido?

- ☐ Siempre
- ☐ A veces
- ☐ Nunca

12. ¿Escucha pero no entiende?

- ☐ Siempre
- ☐ A veces
- ☐ Nunca

13. ¿Tiene dificultades para oír a alguien susurrando?

- ☐ Sí
- ☐ A veces
- ☐ No

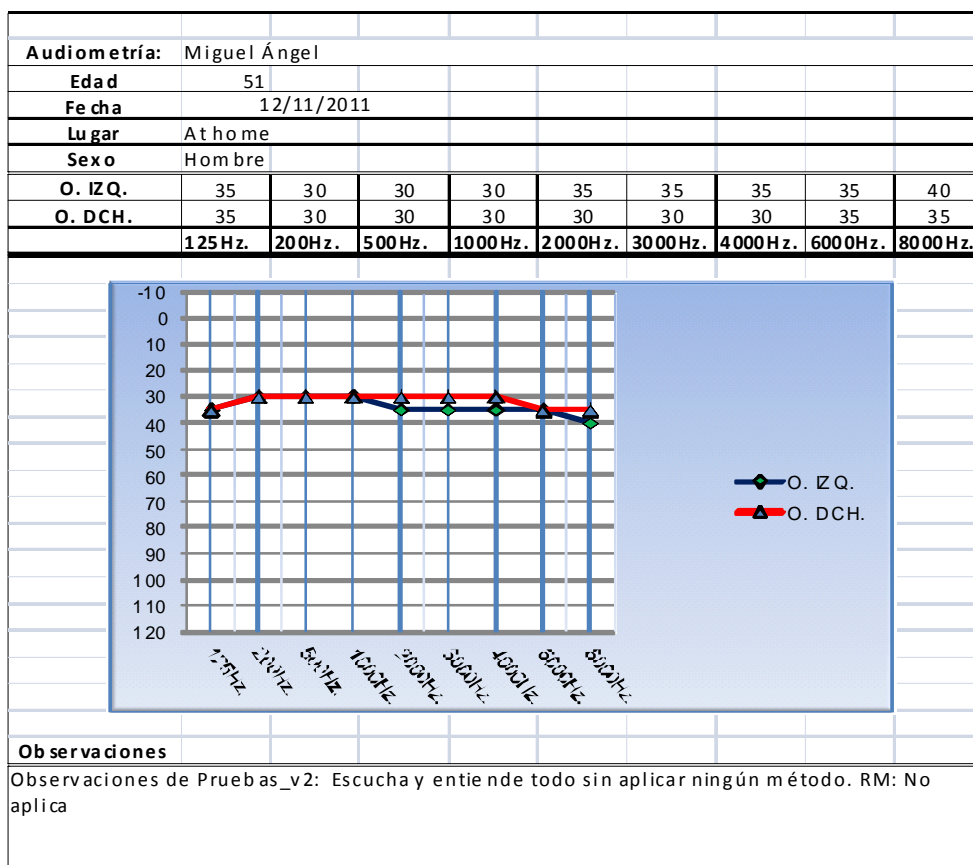
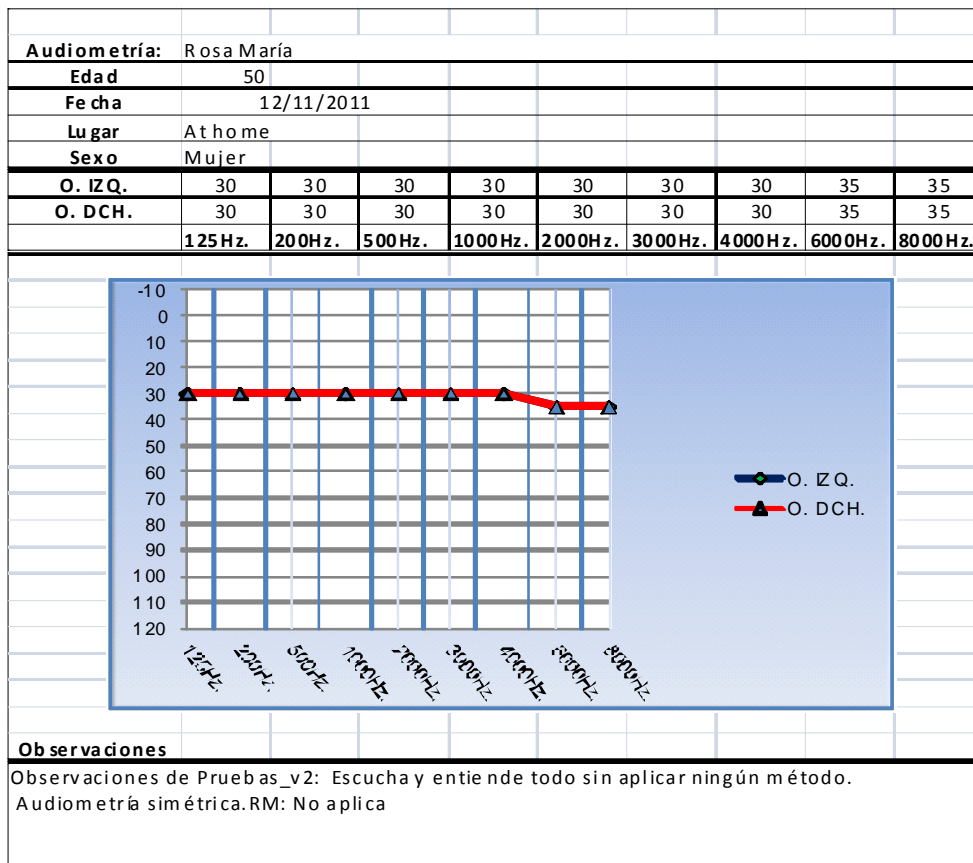
14. ¿Tiene dificultades para oír las voces de los niños?

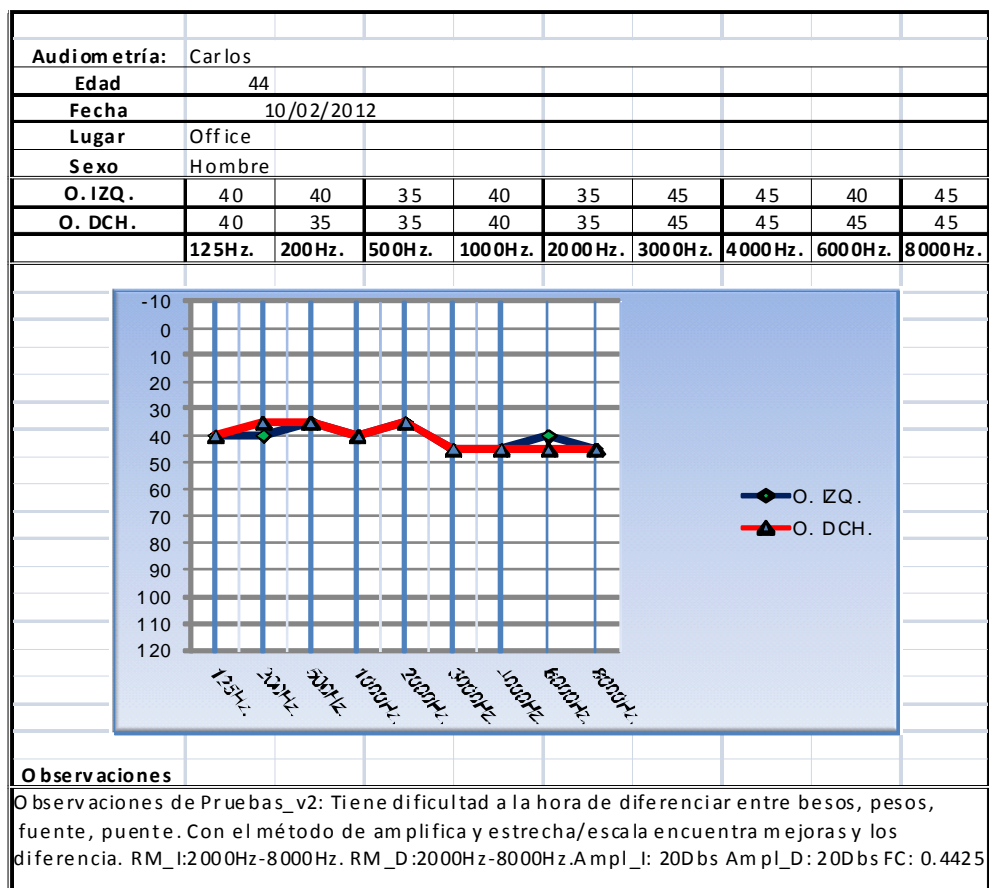
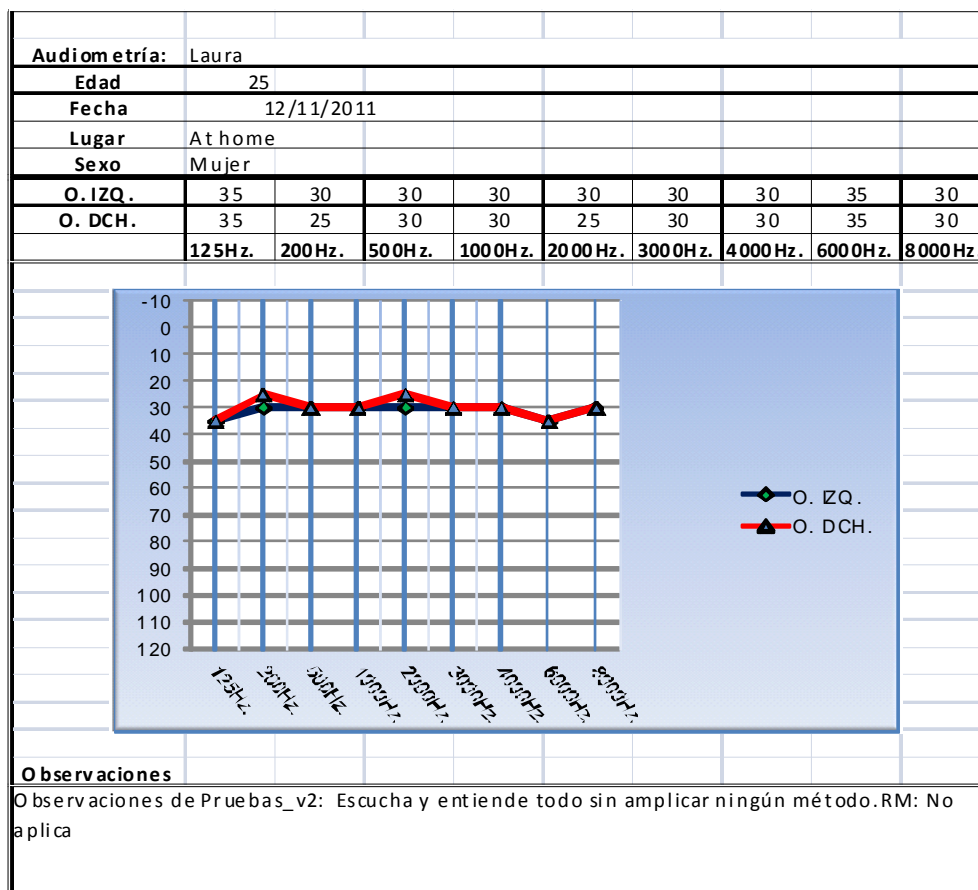
- ☐ Sí
- ☐ A veces
- ☐ No

Anexo II

Fichas voluntarios

En este anexo están las fichas de todos los pacientes que se presentaron voluntarios a realizar las pruebas:





Audiometría: Tomás									
Edad	41								
Fecha	10/02/2012								
Lugar	Oficina								
Sexo	Hombre								
O. IZQ.	40	35	35	35	35	35	35	35	35
O. DCH.	35	35	35	35	35	35	35	35	35
	125 Hz.	200 Hz.	500 Hz.	1000 Hz.	2000 Hz.	3000 Hz.	4000 Hz.	6000 Hz.	8000 Hz.

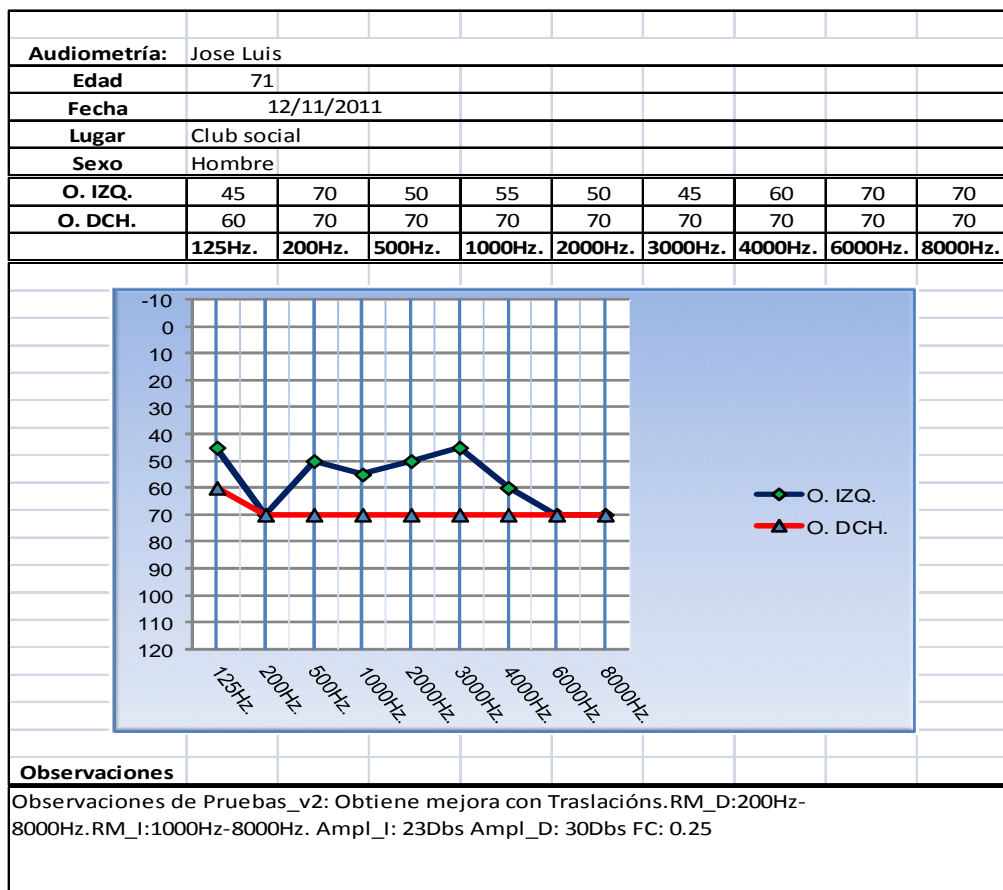
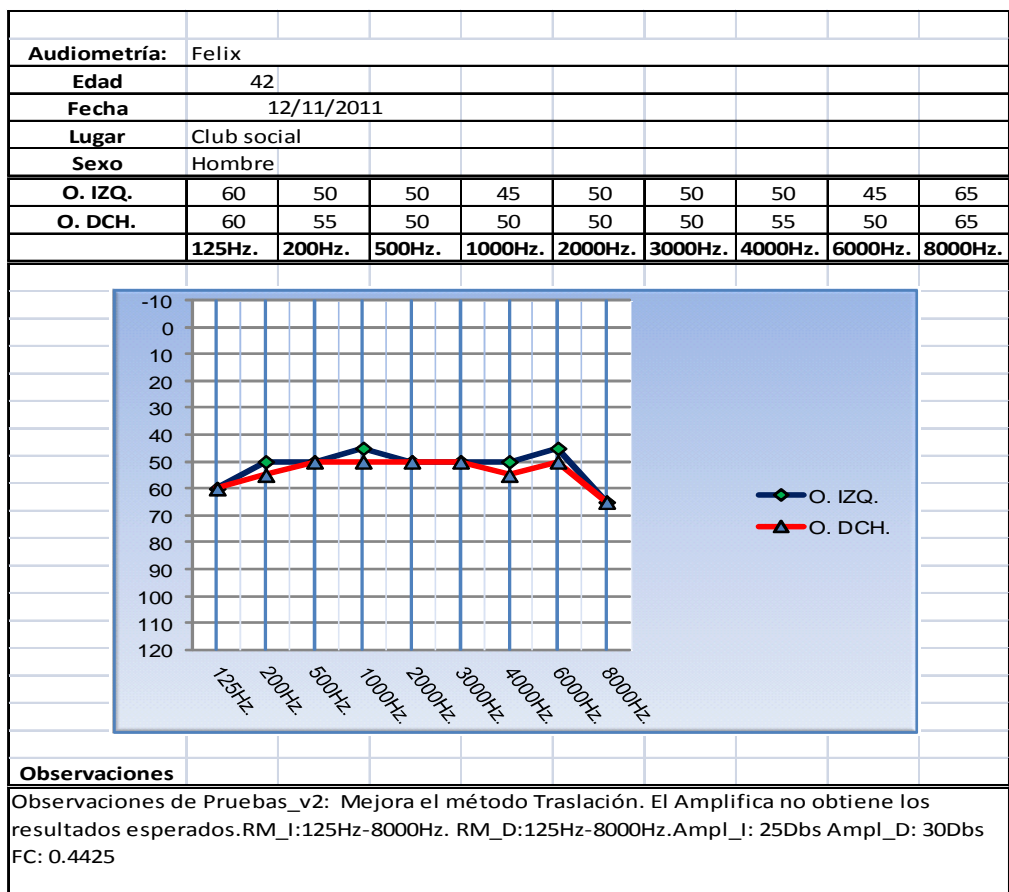
Observaciones

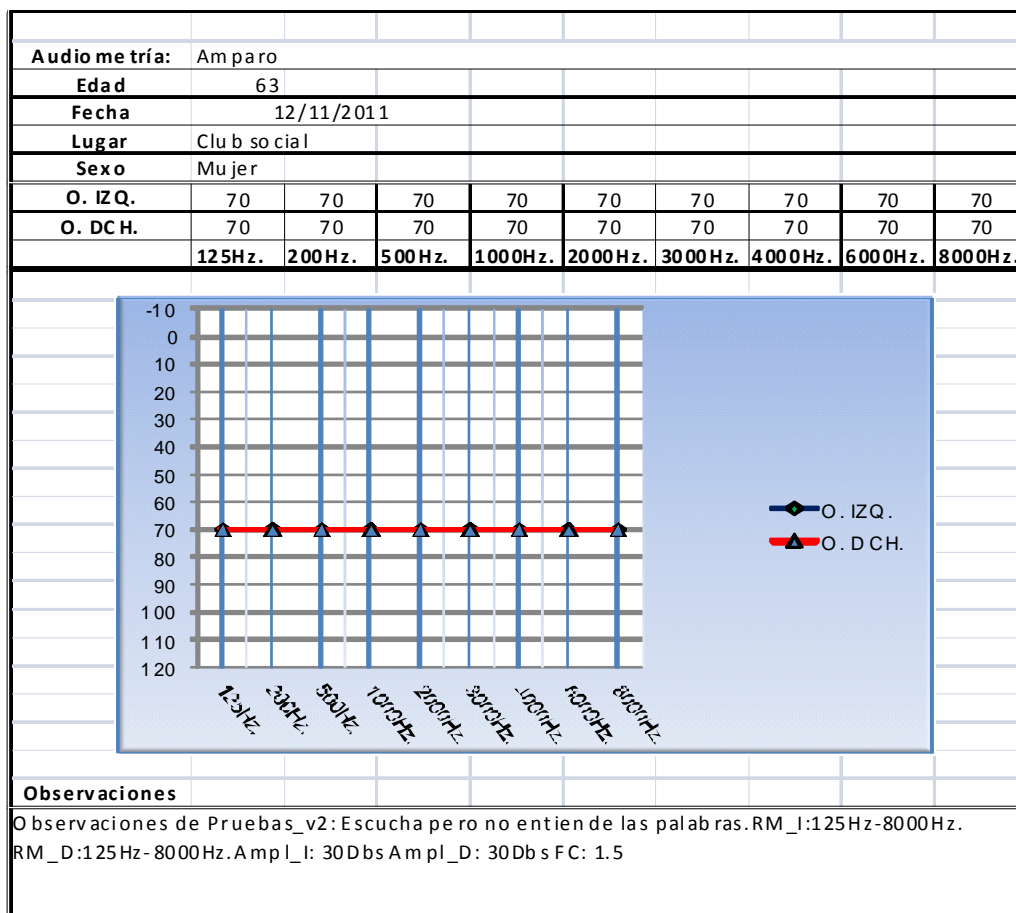
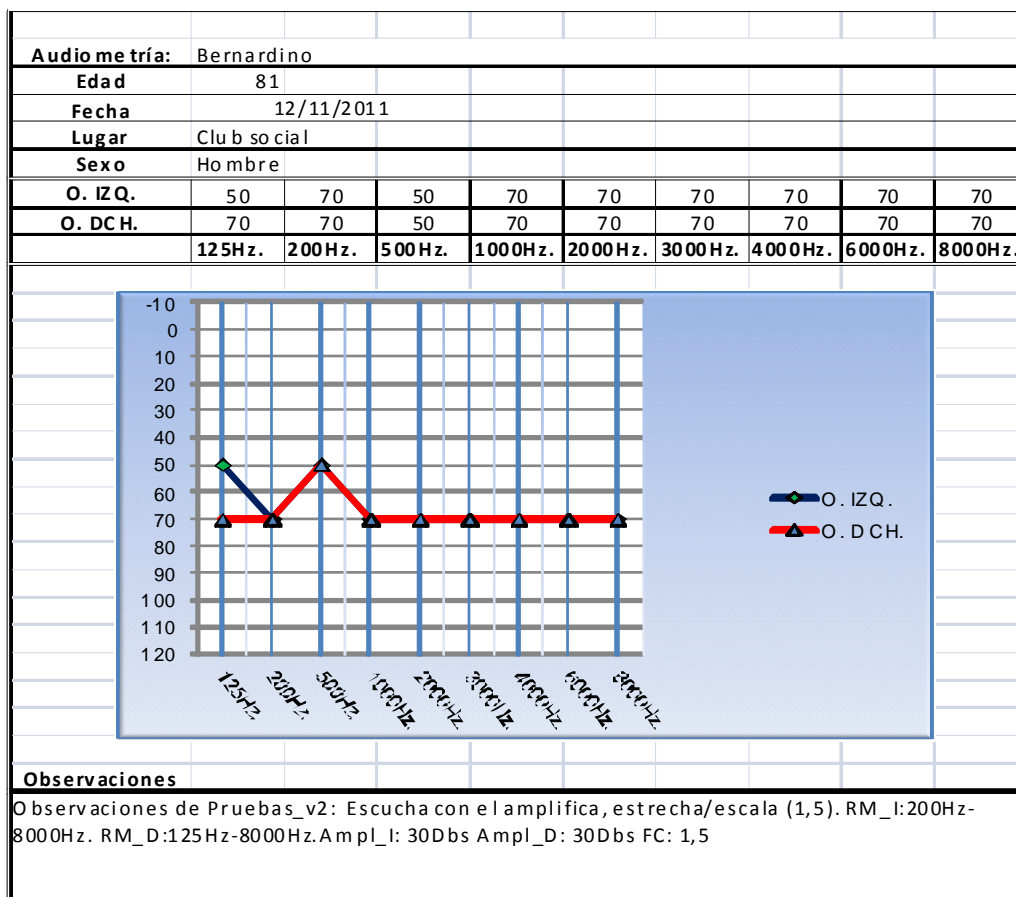
Observaciones de Pruebas_v2: Escucha y entiende todo sin amplificar ningún método. RM: No aplica

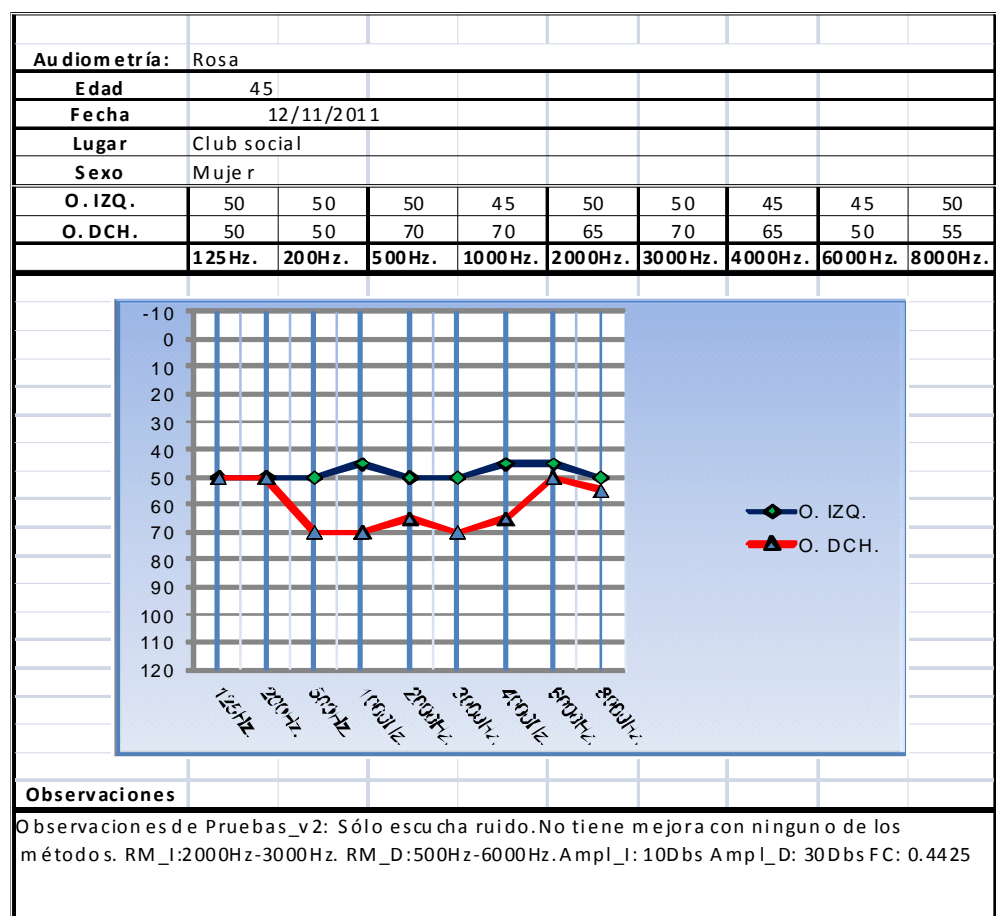
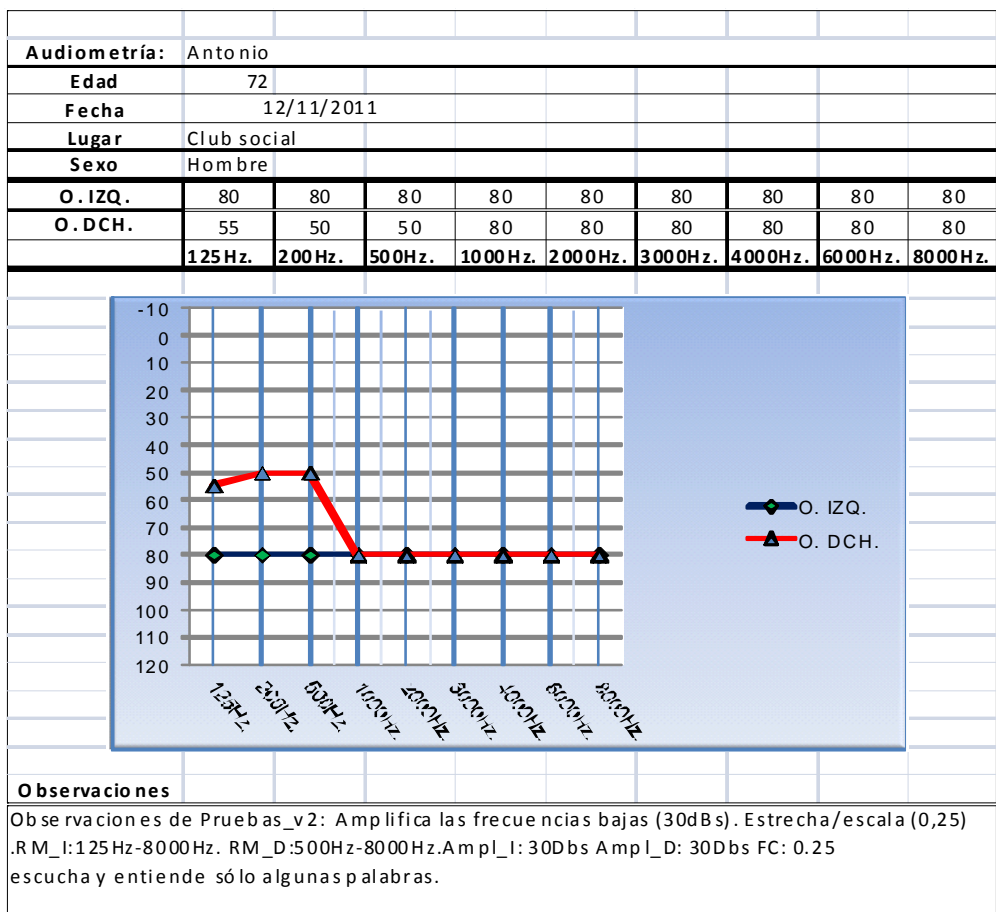
Audiometría: Javier									
Edad	41								
Fecha	10/02/2012								
Lugar	Oficina								
Sexo	Hombre								
O. IZQ.	45	40	35	30	35	45	45	50	50
O. DCH.	40	40	40	40	40	45	50	50	55
	125 Hz.	200 Hz.	500 Hz.	1000 Hz.	2000 Hz.	3000 Hz.	4000 Hz.	6000 Hz.	8000 Hz.

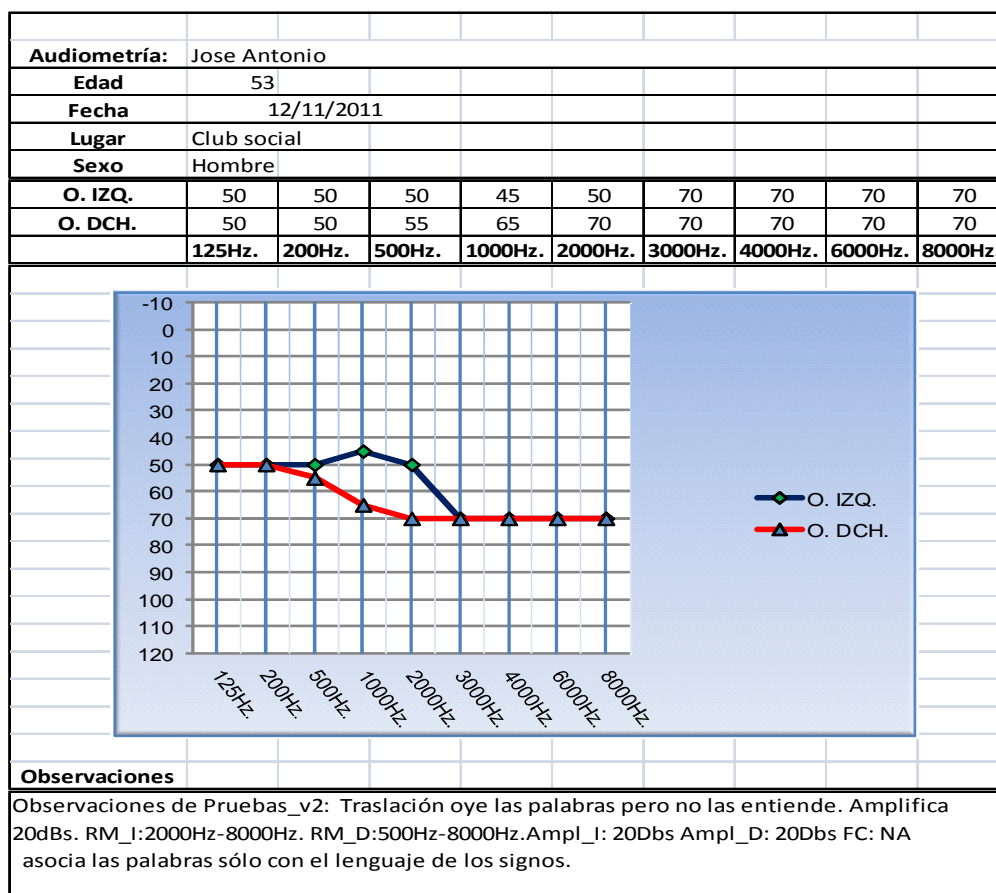
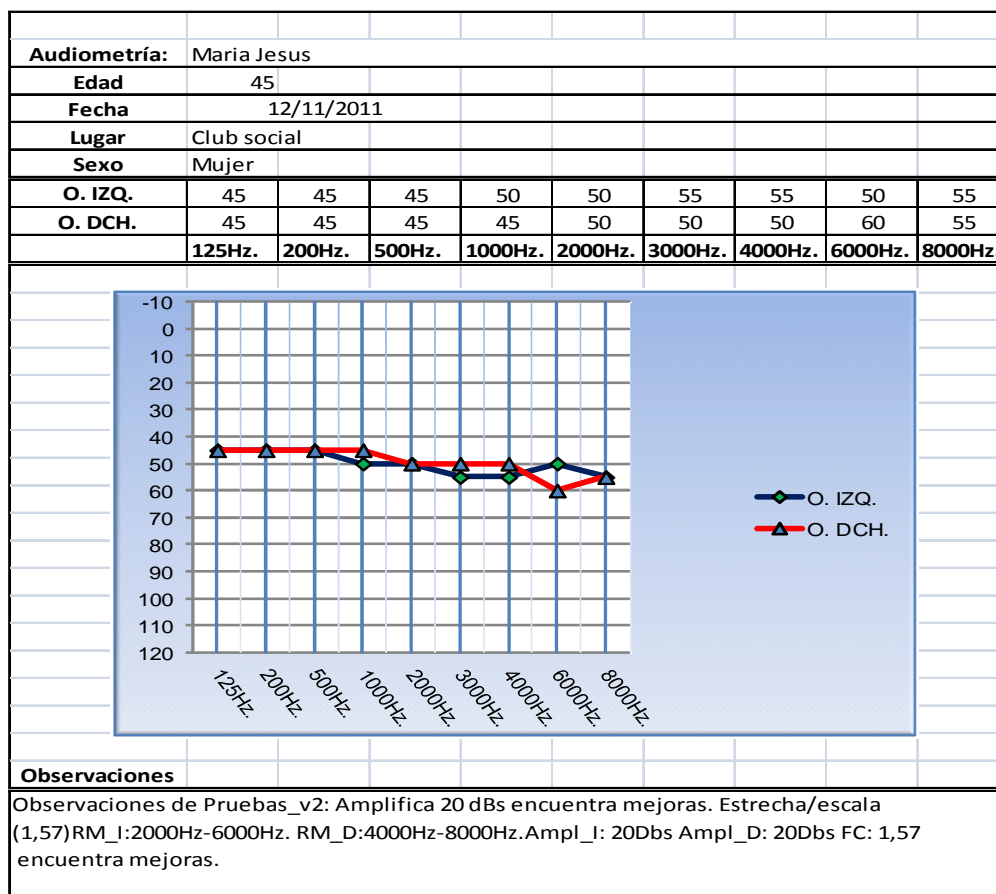
Observaciones

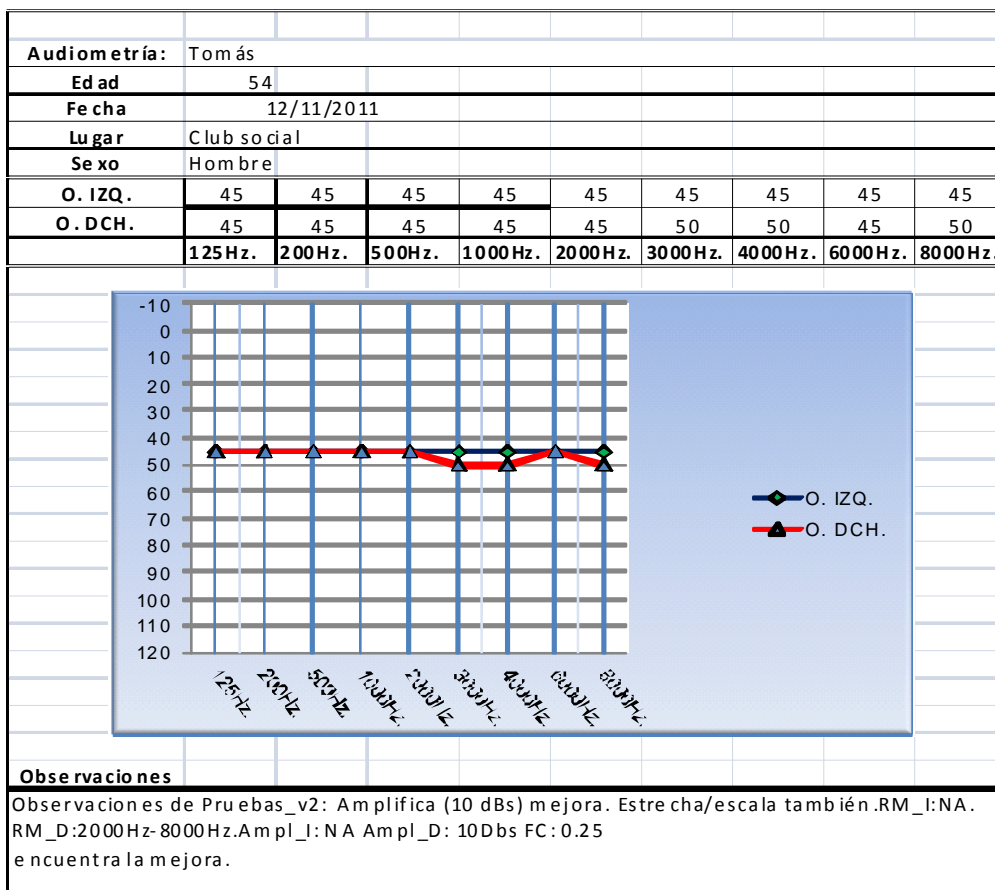
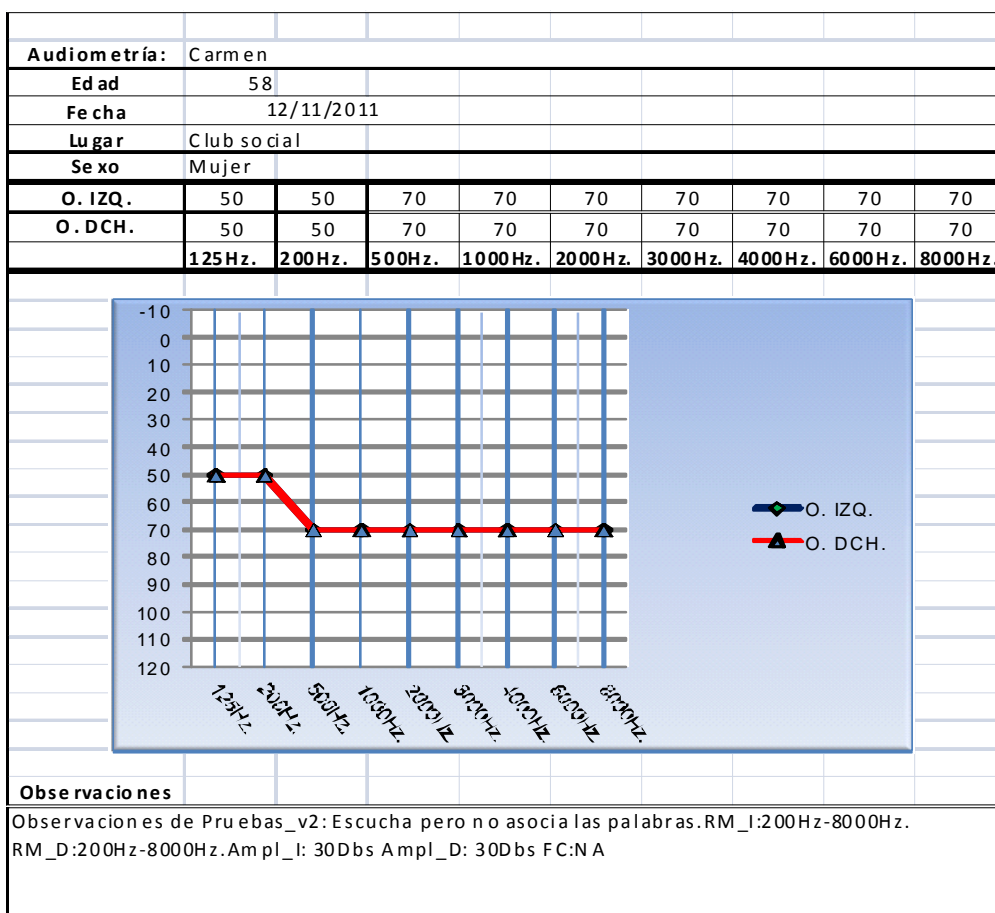
Observaciones de Pruebas_v2: No diferencia los plurales y singulares de las palabras, aunque tiene mejoras al aplicar amplifica. Existen palabras en las frases que no puede identificar. RM_I: 3000 Hz-8000 Hz RM_D: 3000 Hz-8000 Hz. Ampl_I: 20 Dbs Ampl_D: 30 Dbs FC: 0.6875

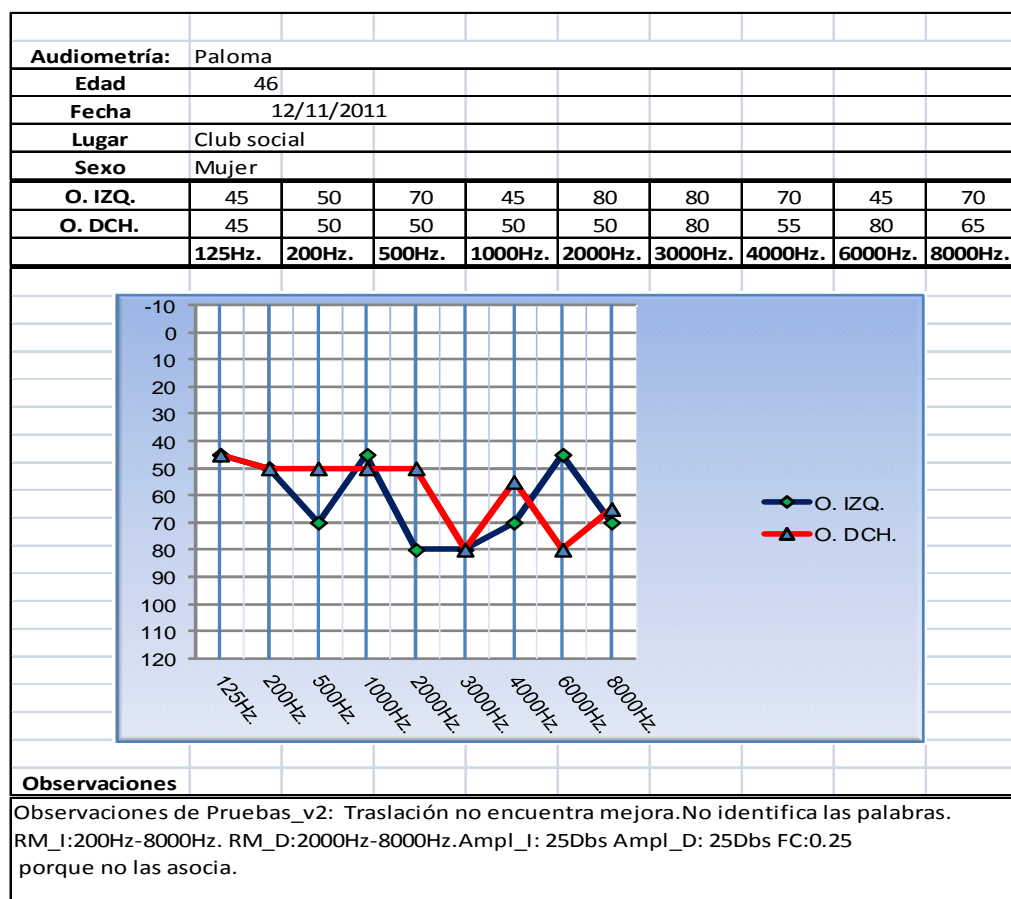
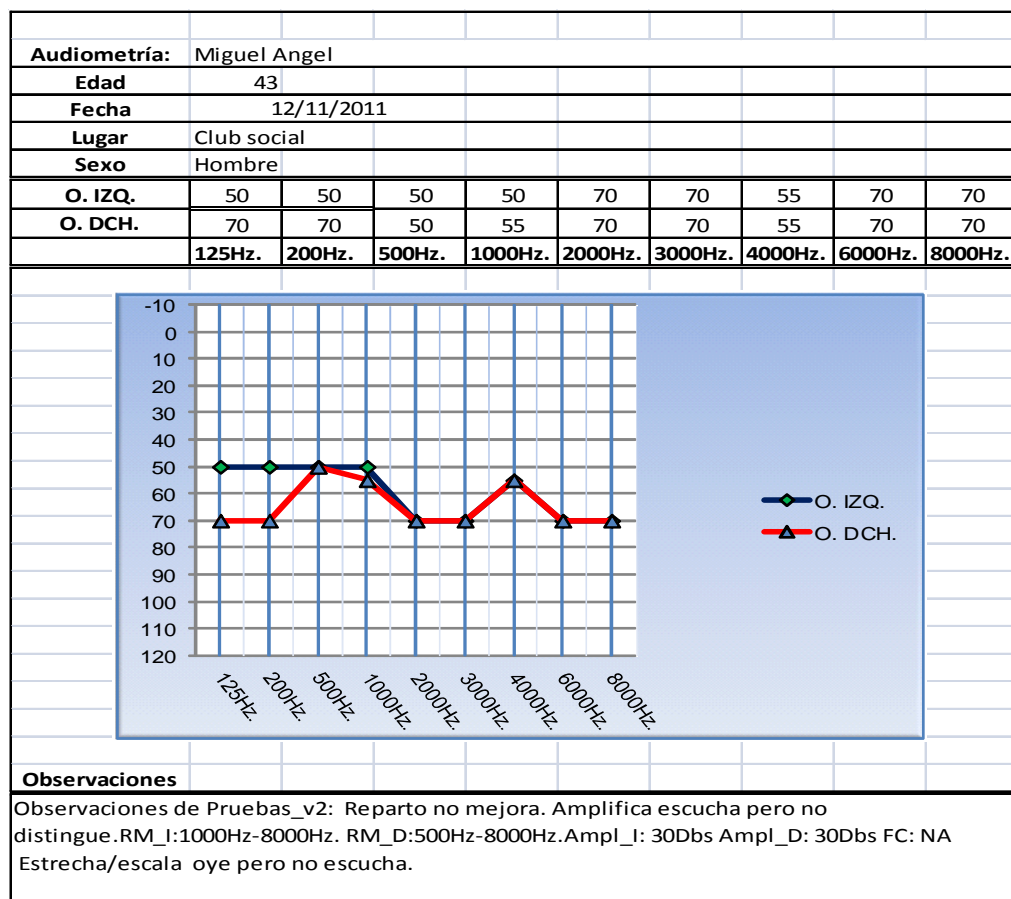


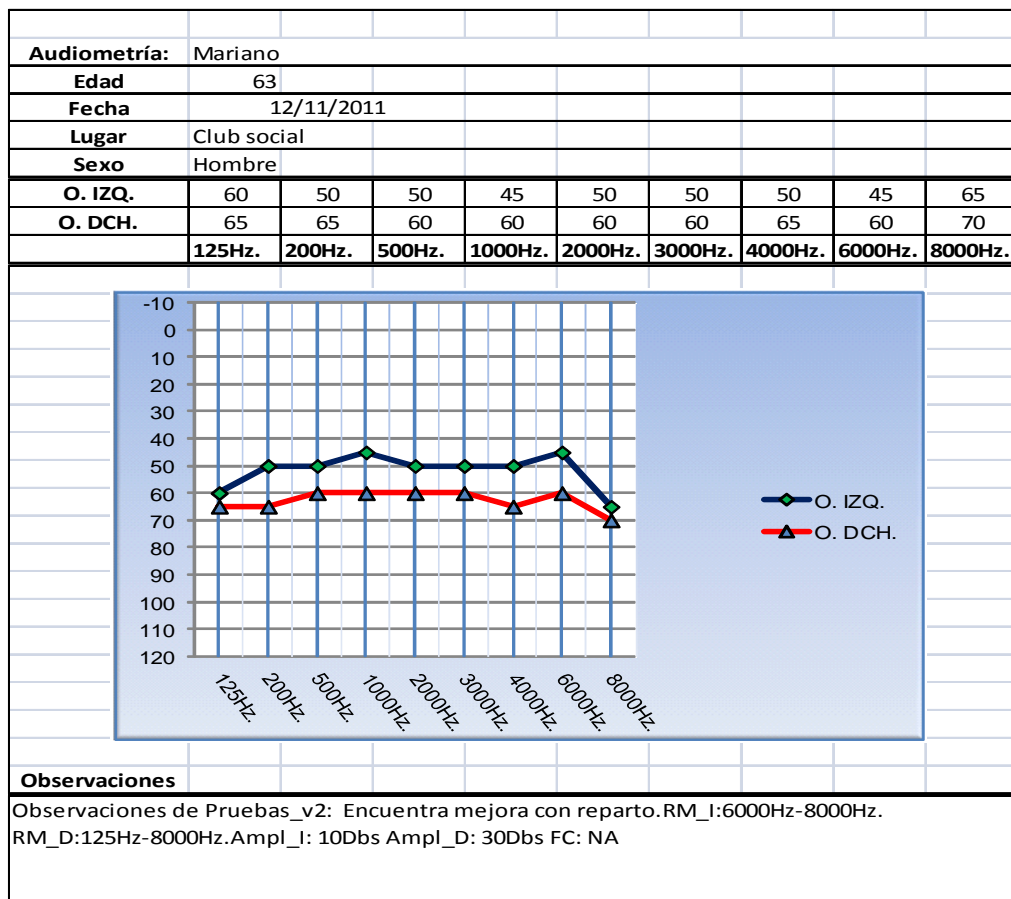
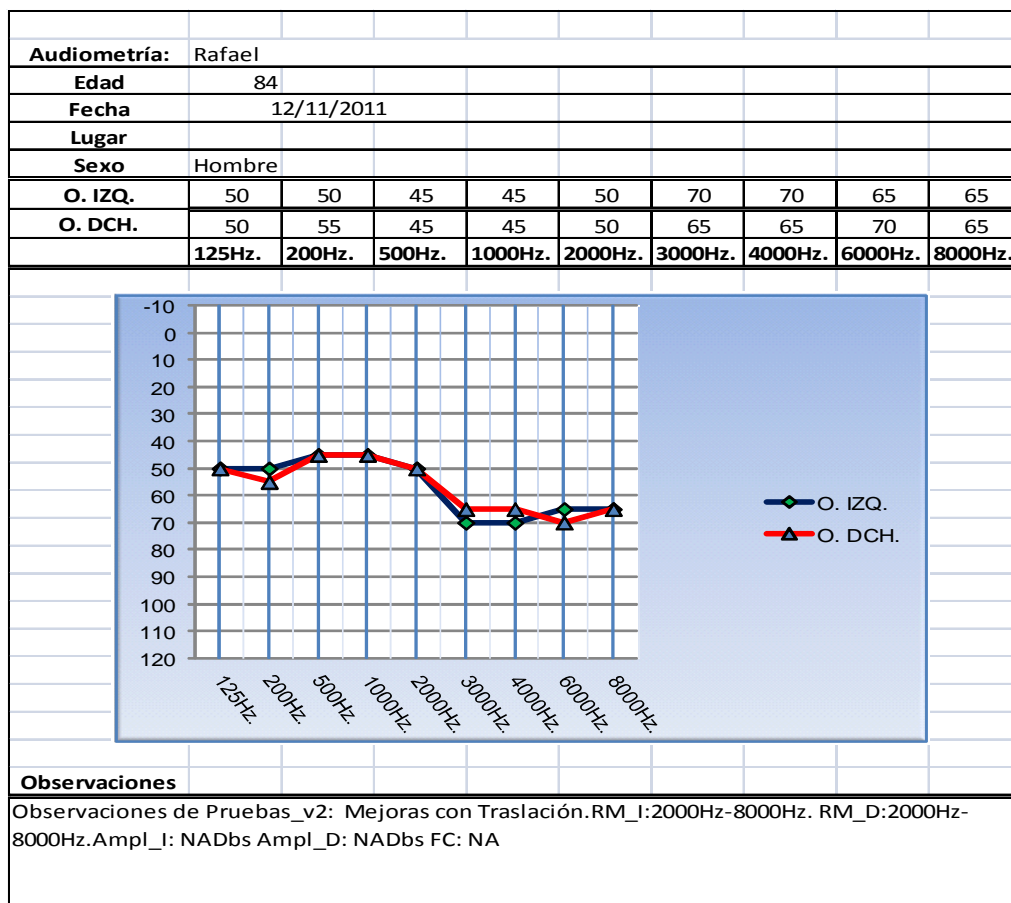


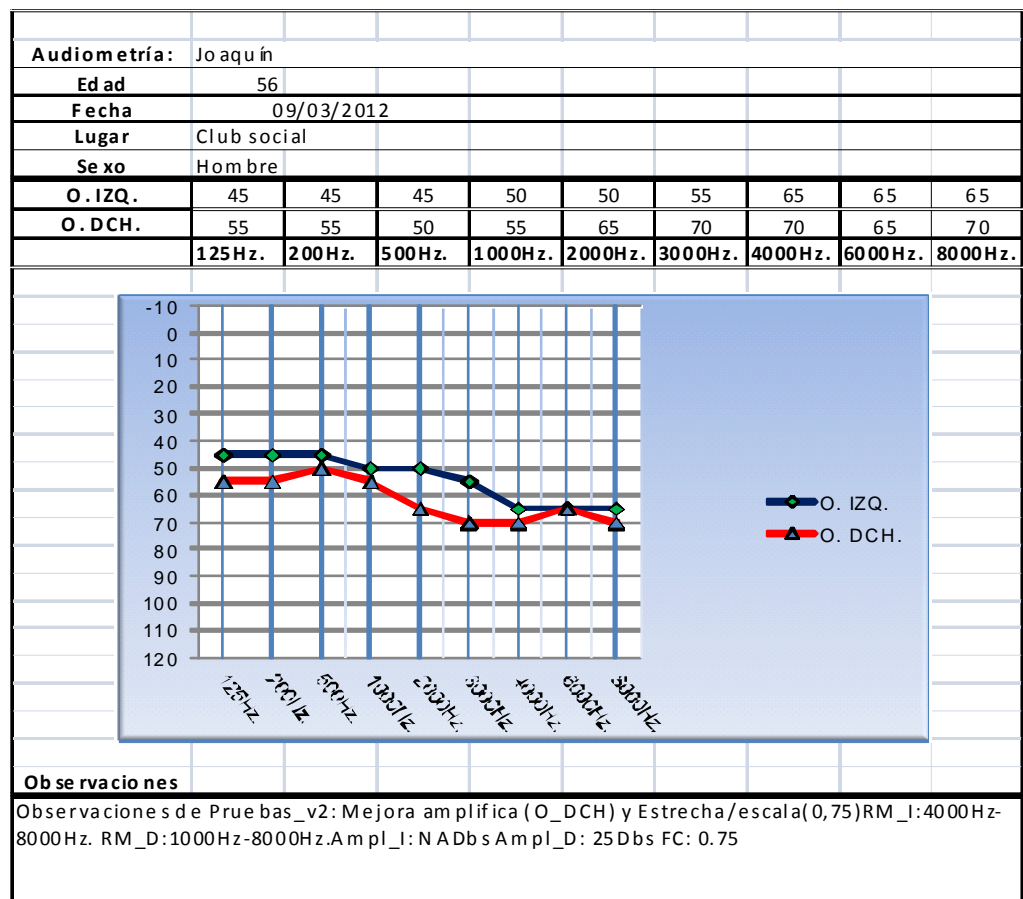
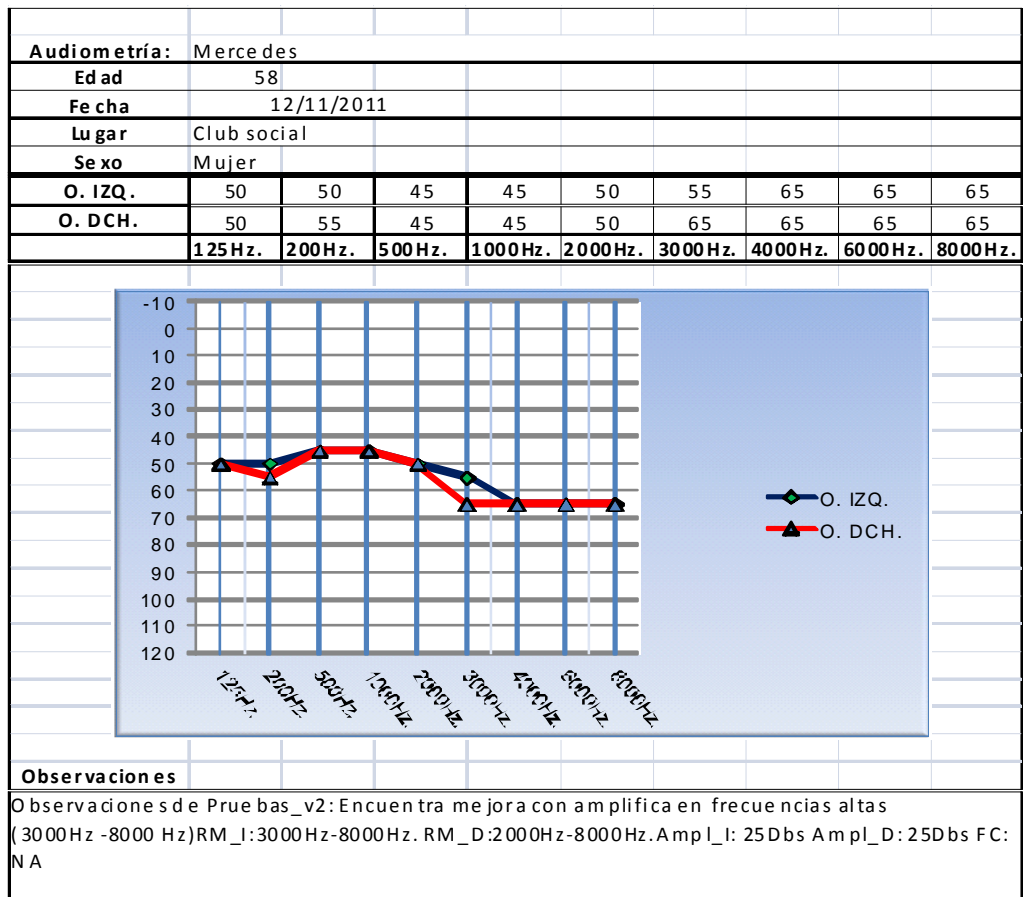


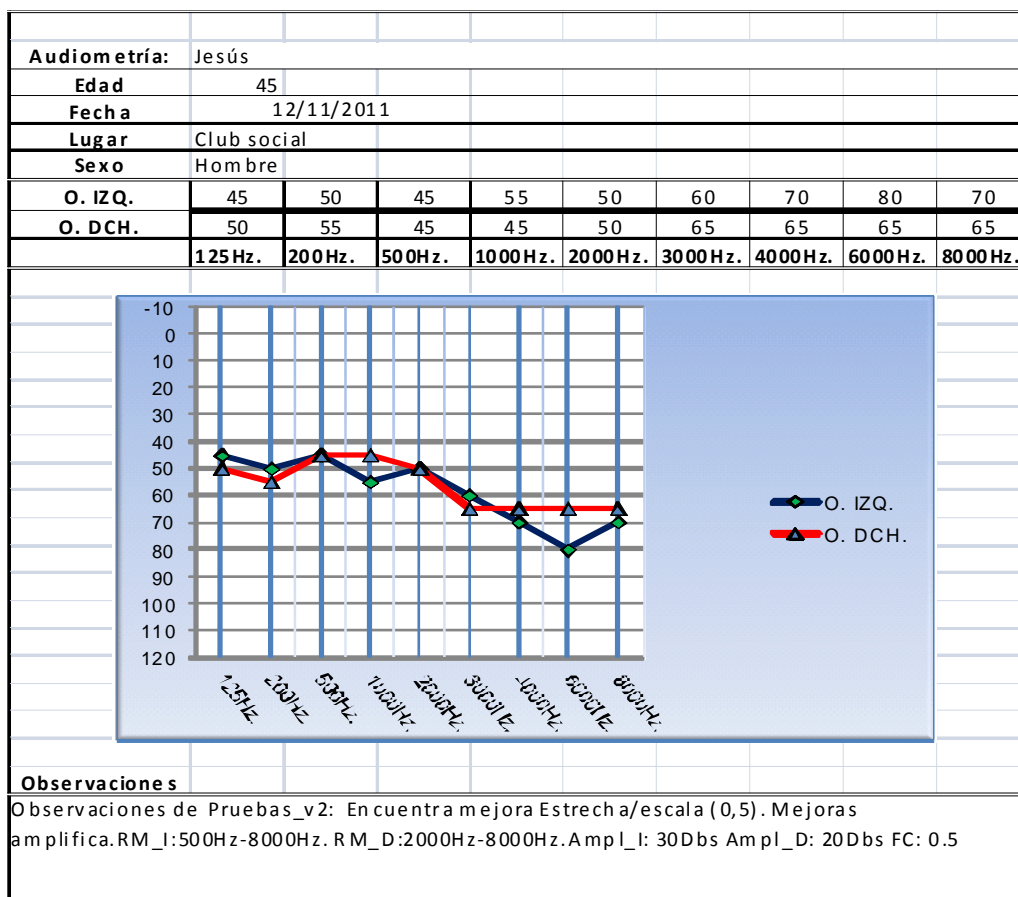
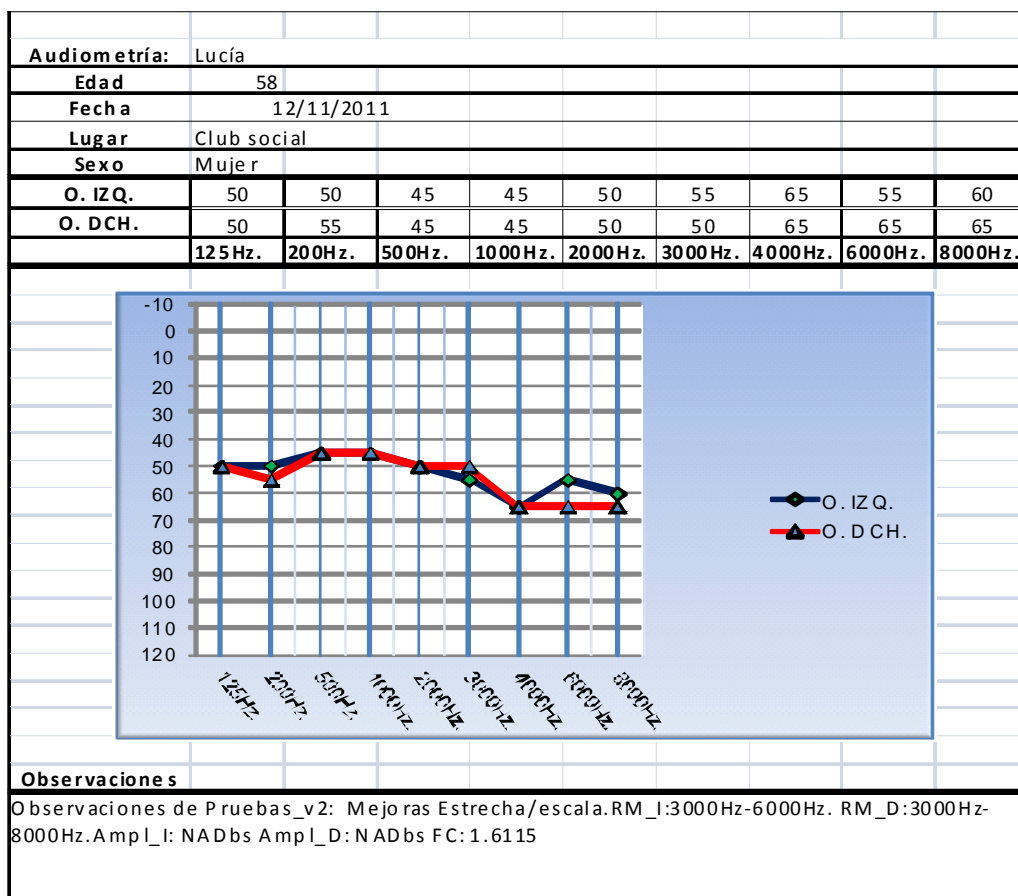


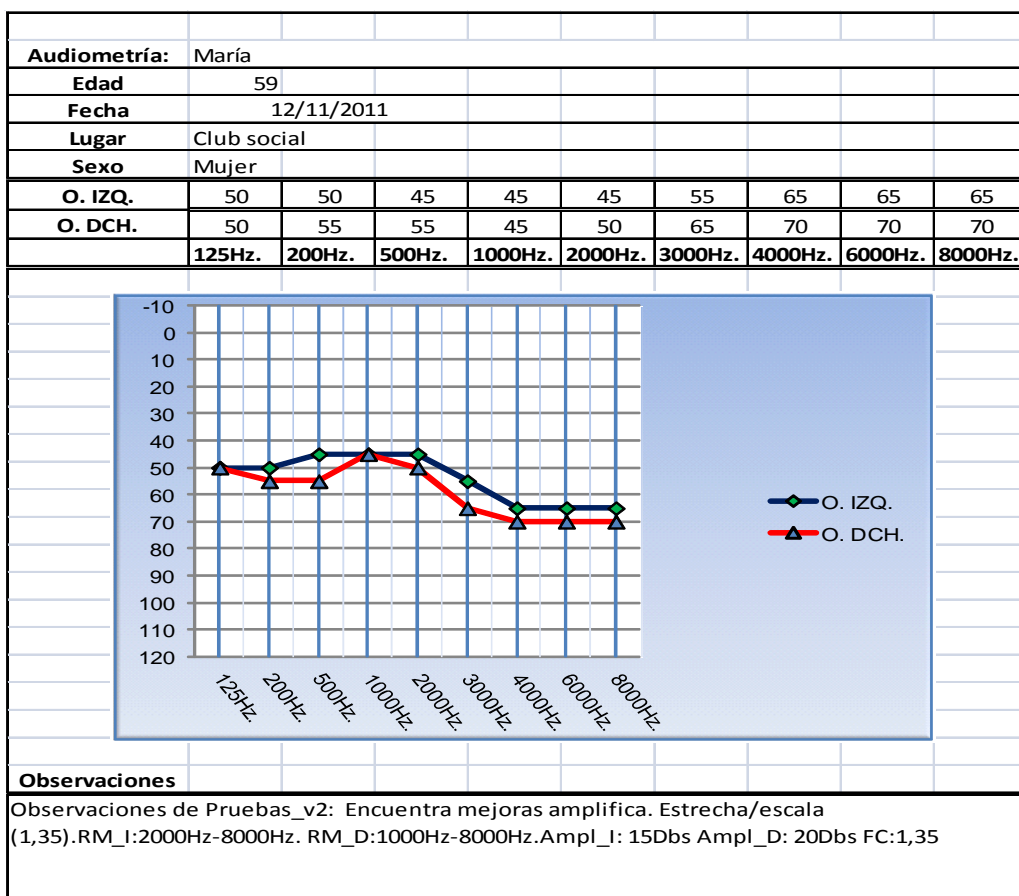
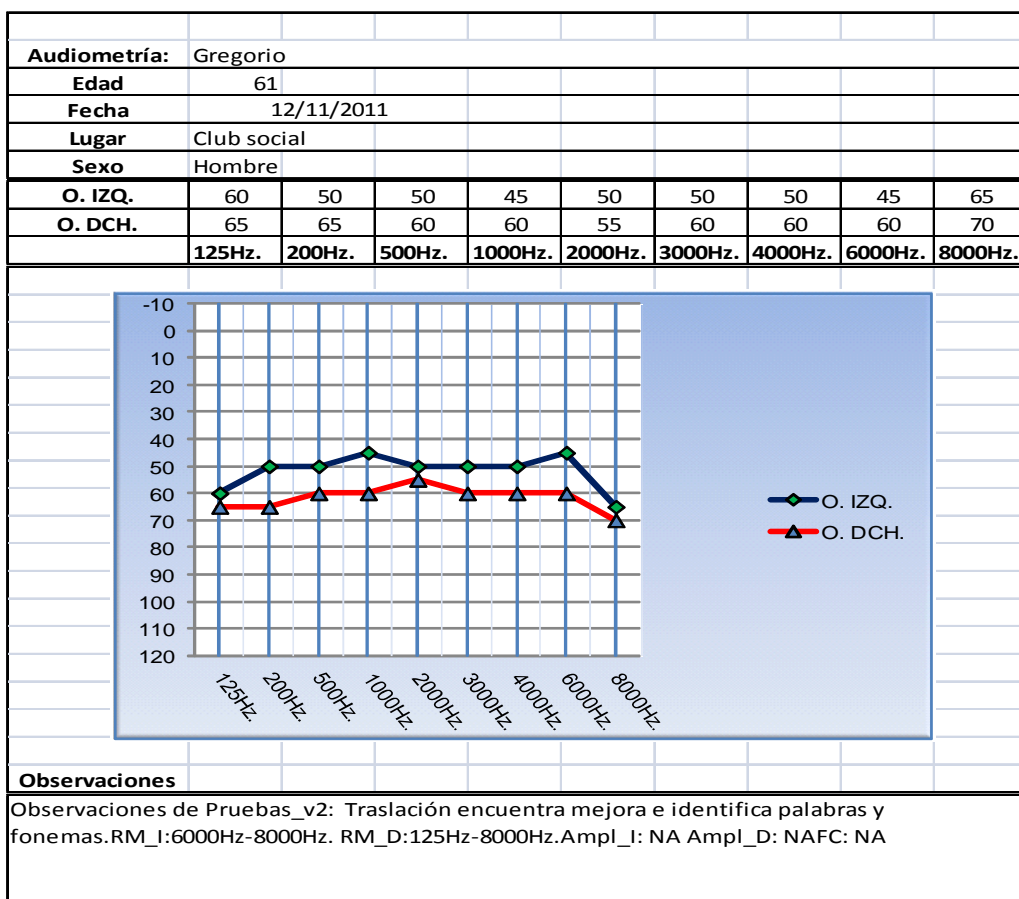


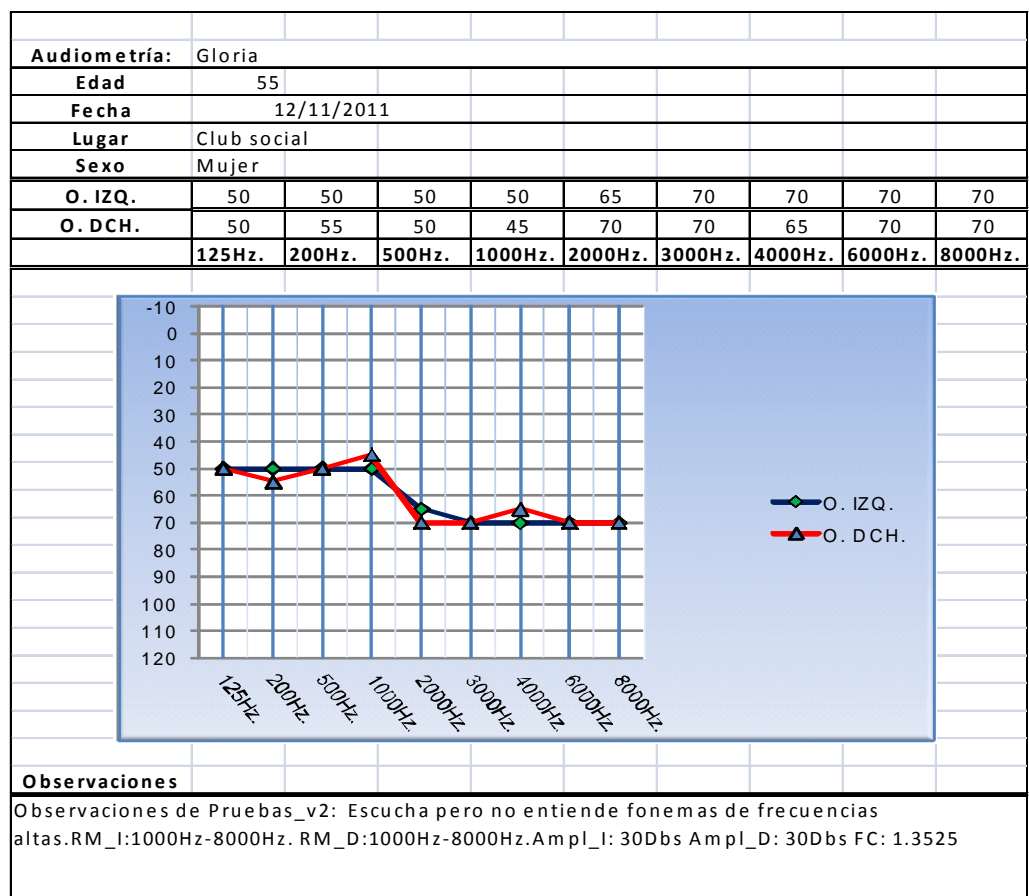
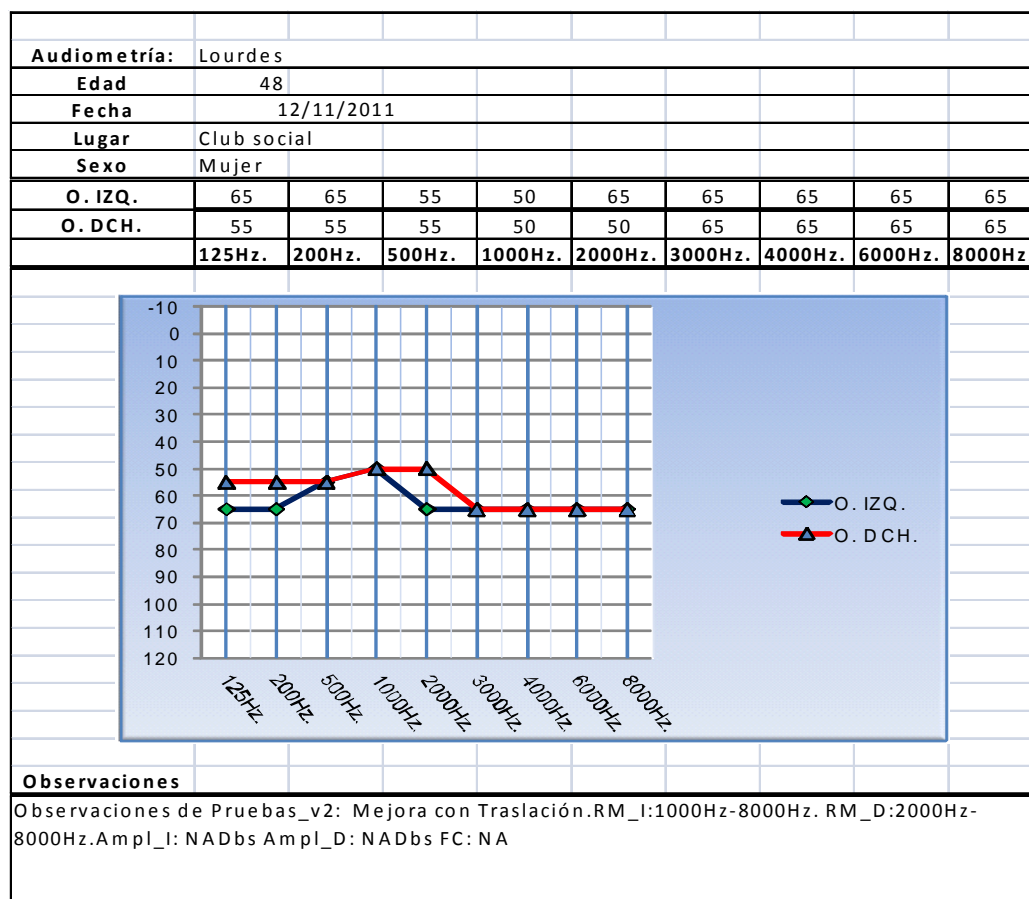


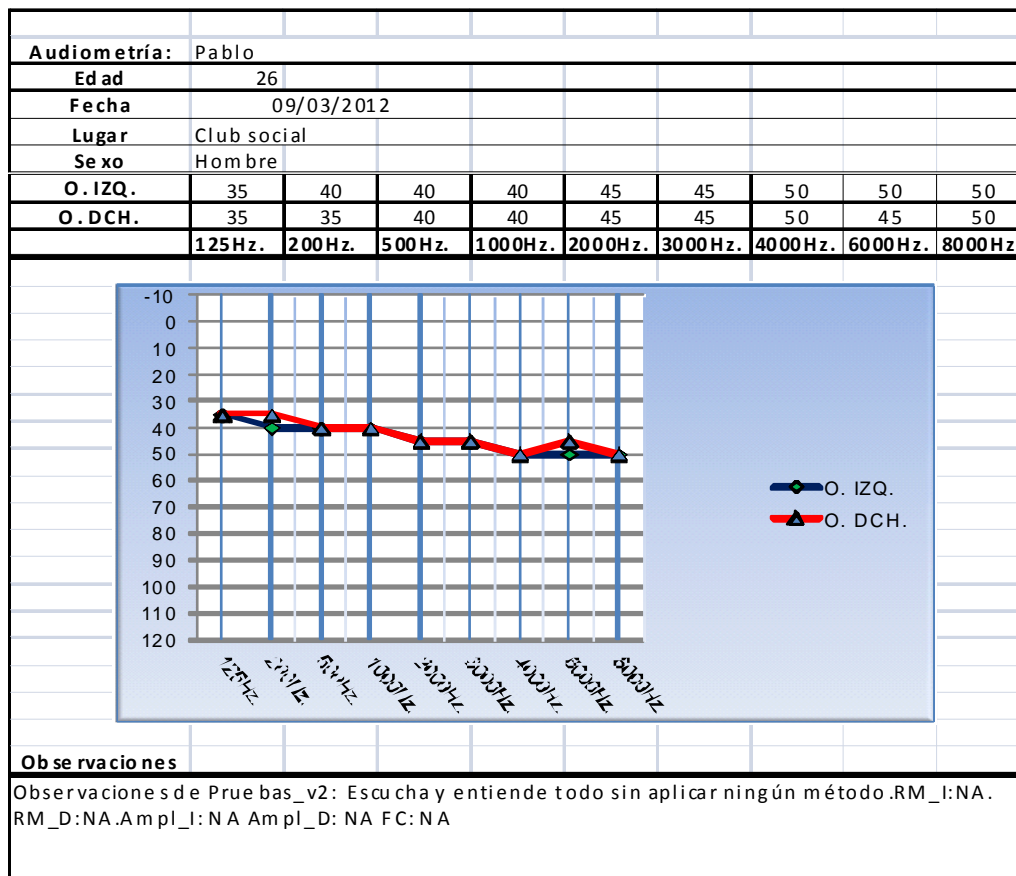
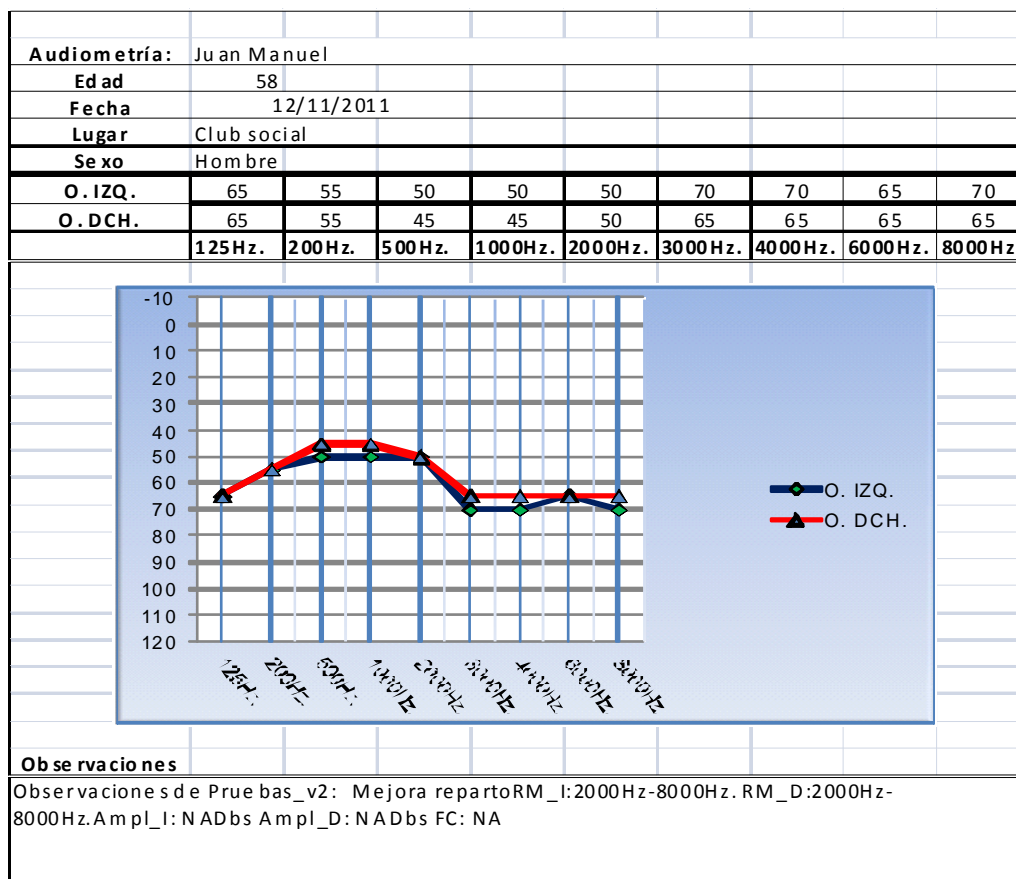


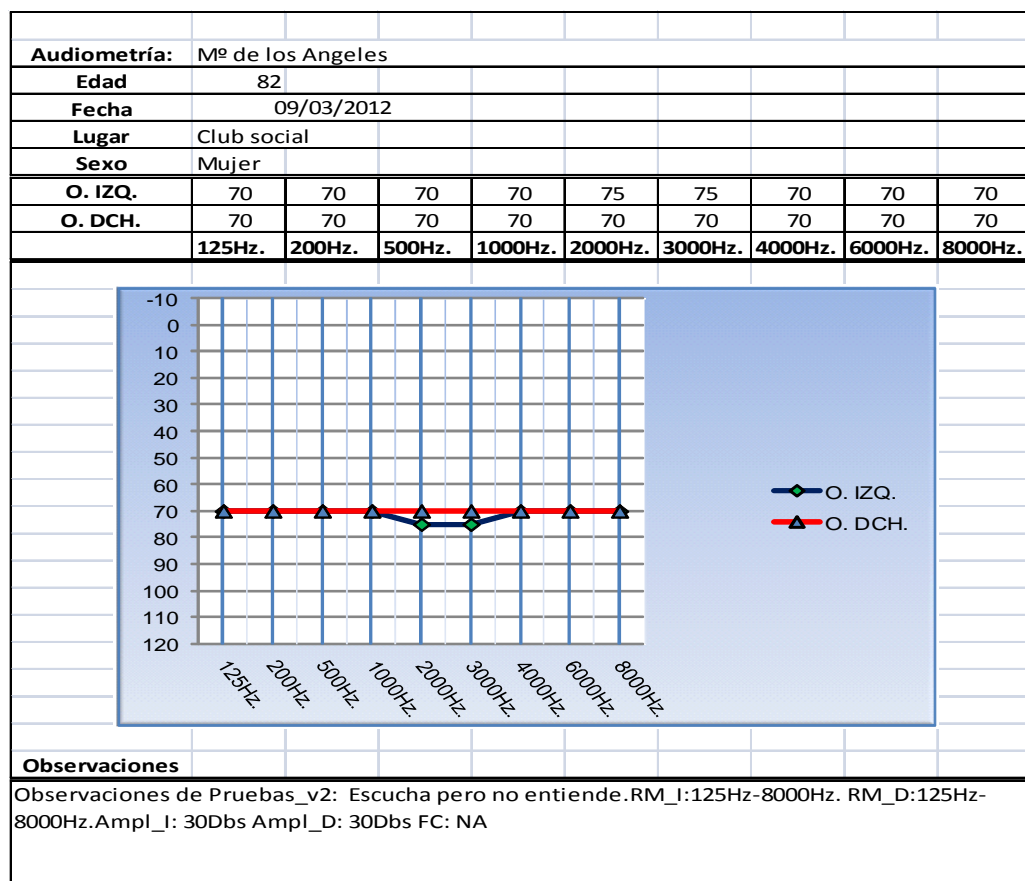
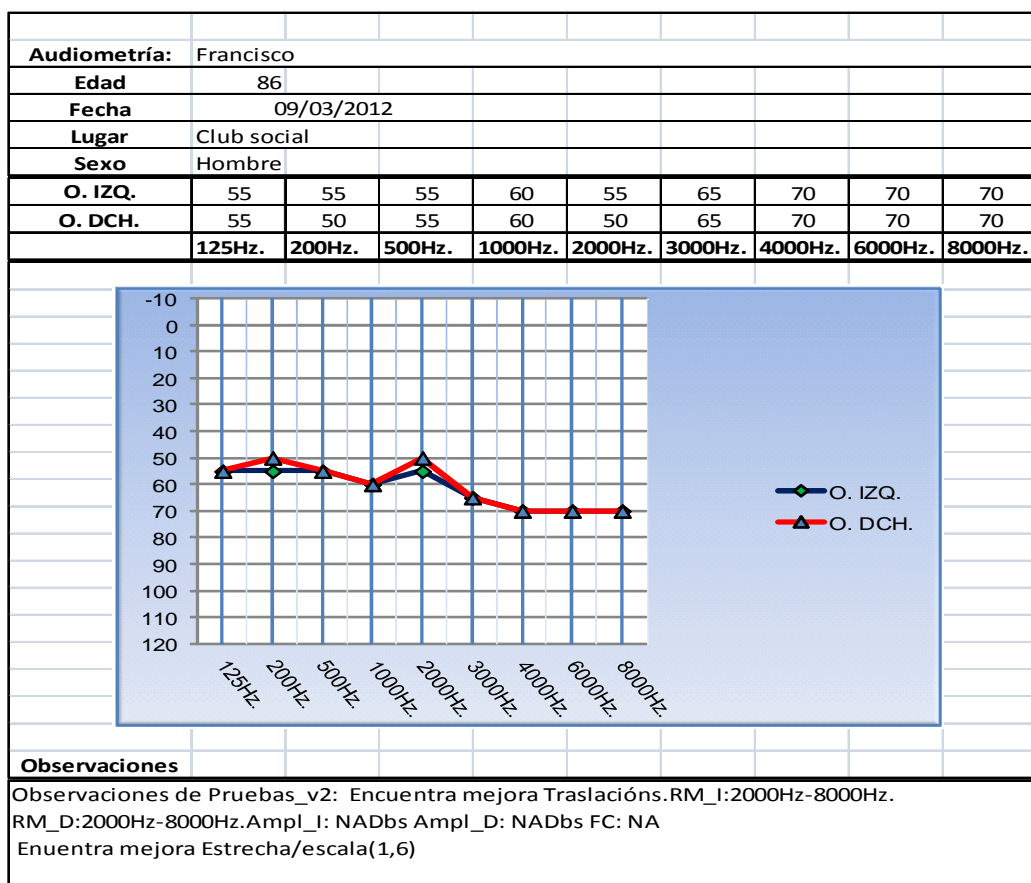


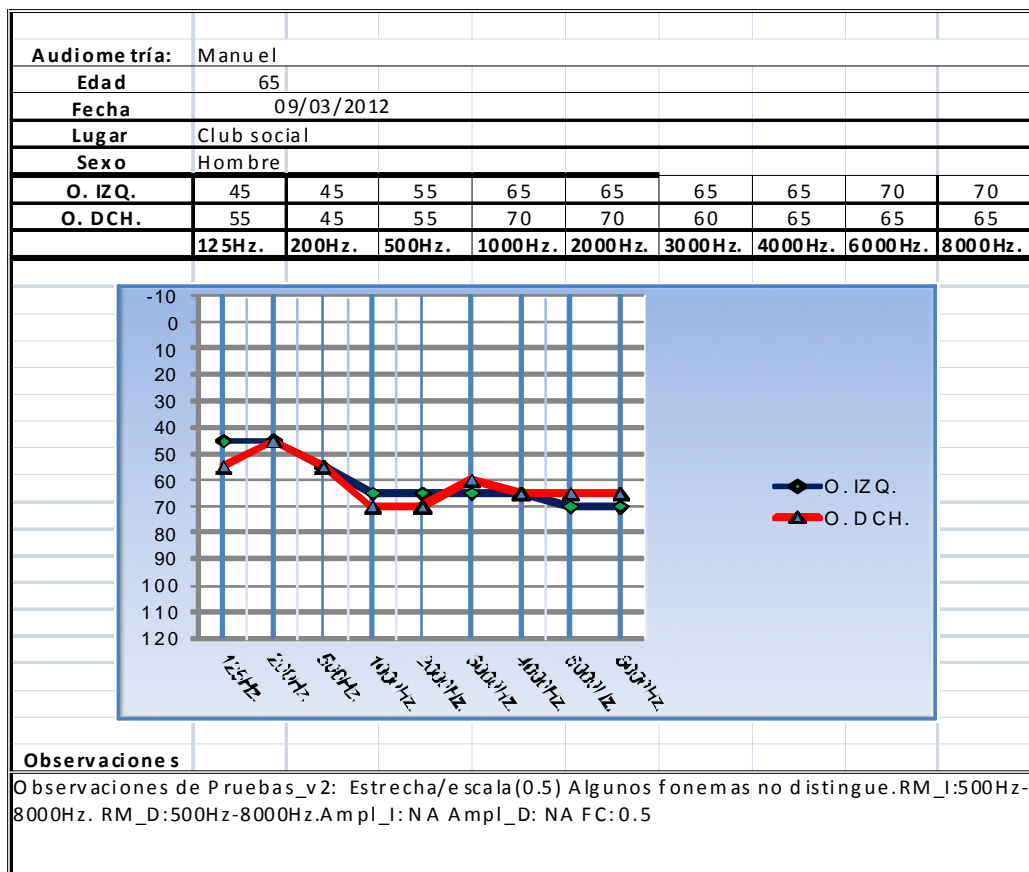
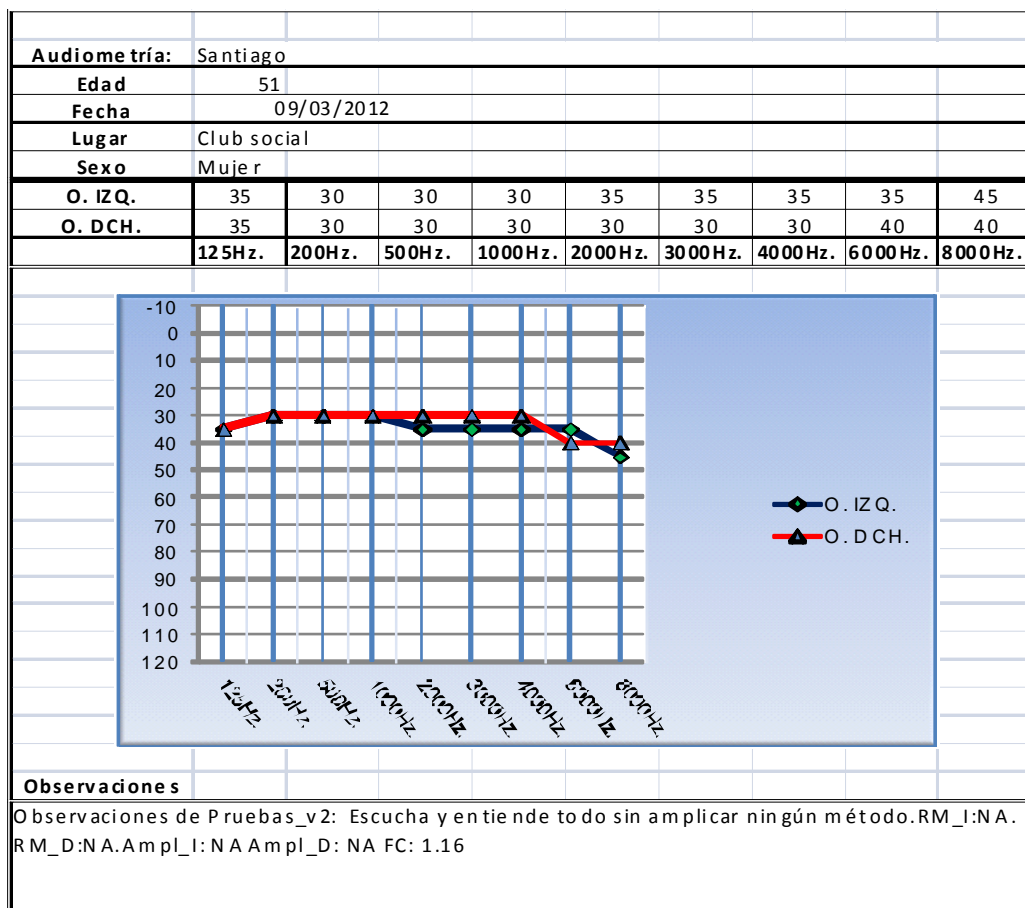


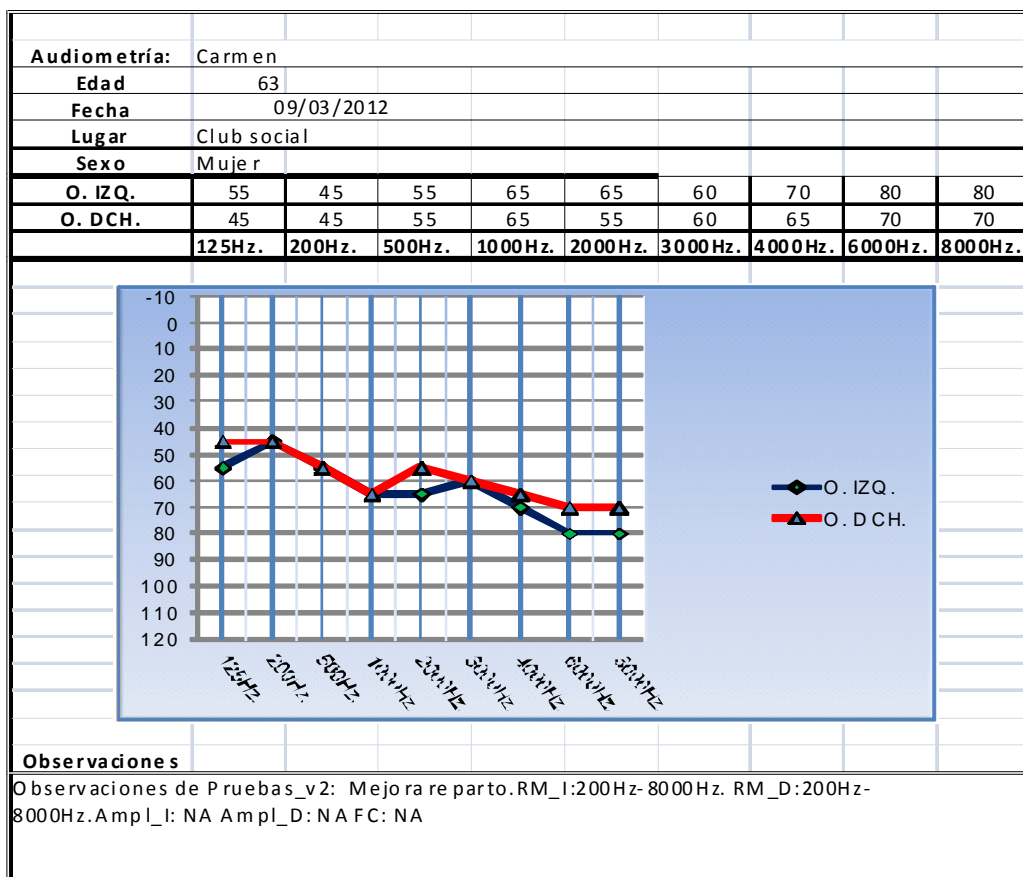
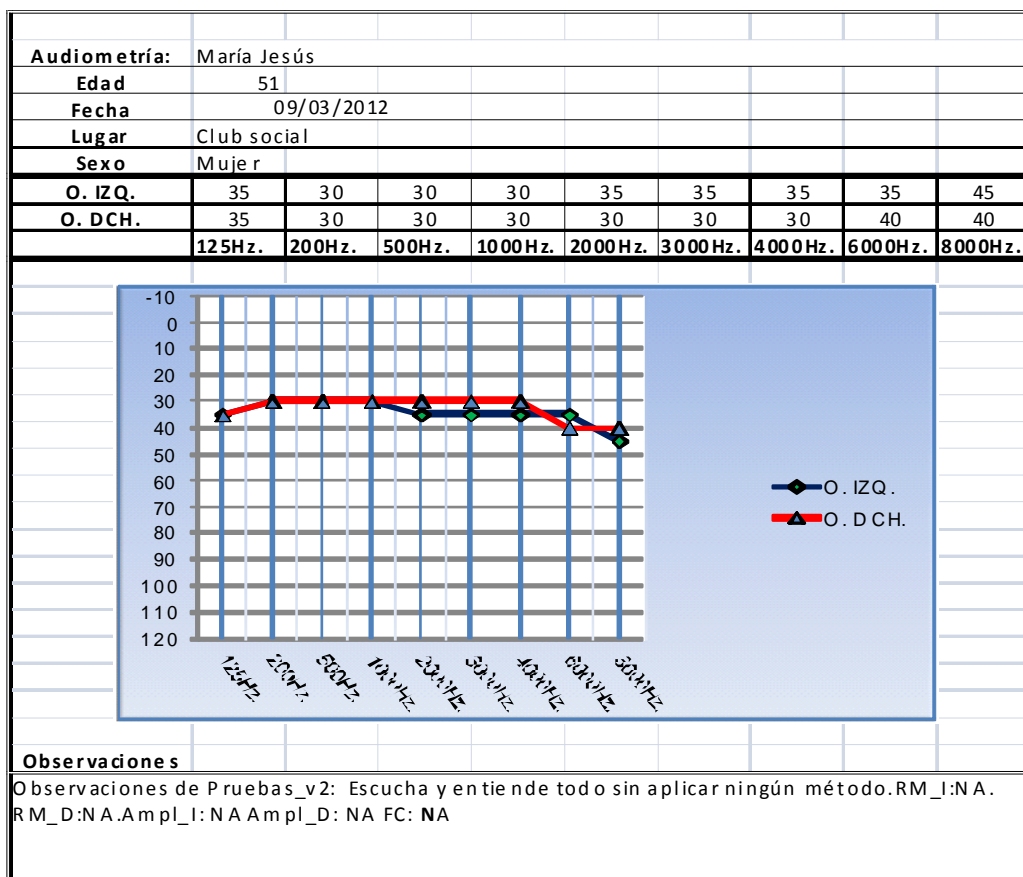


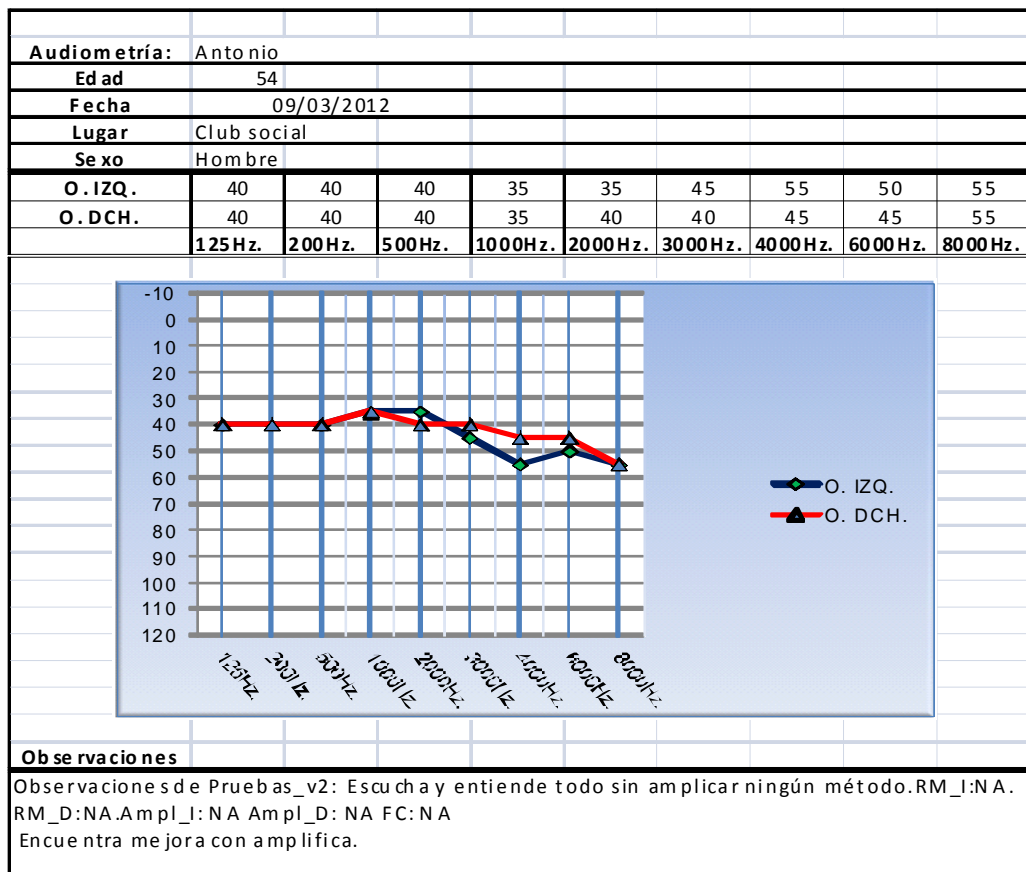
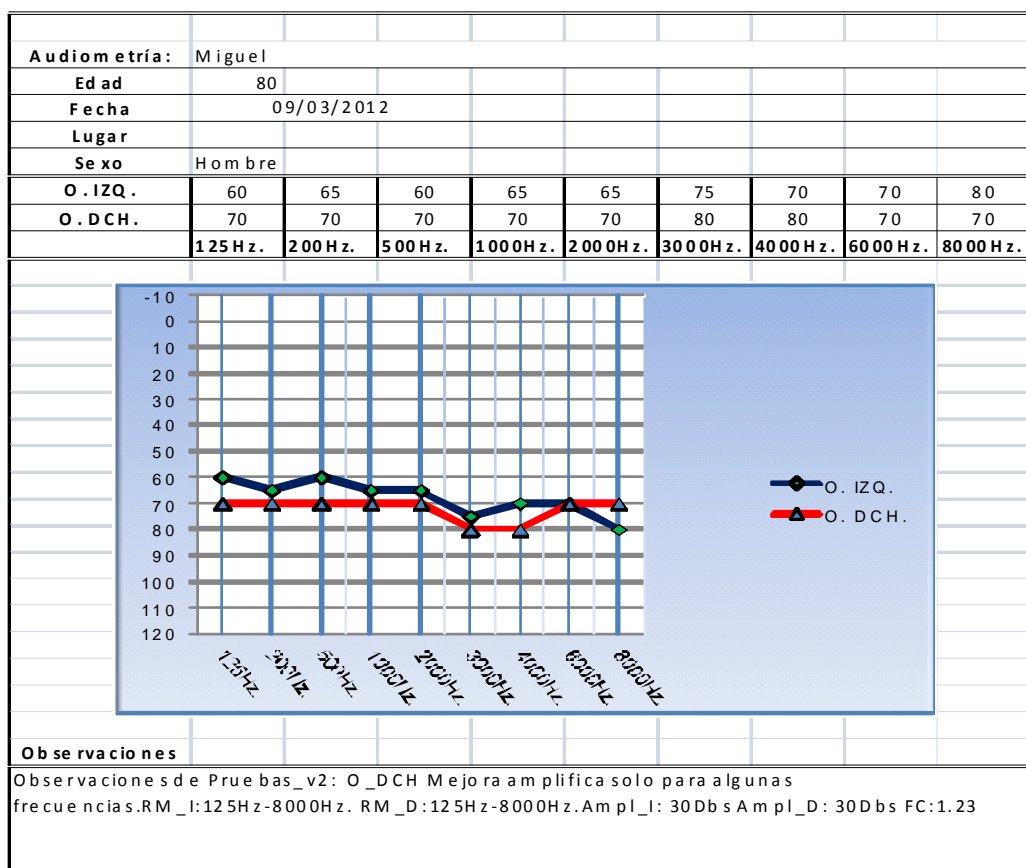


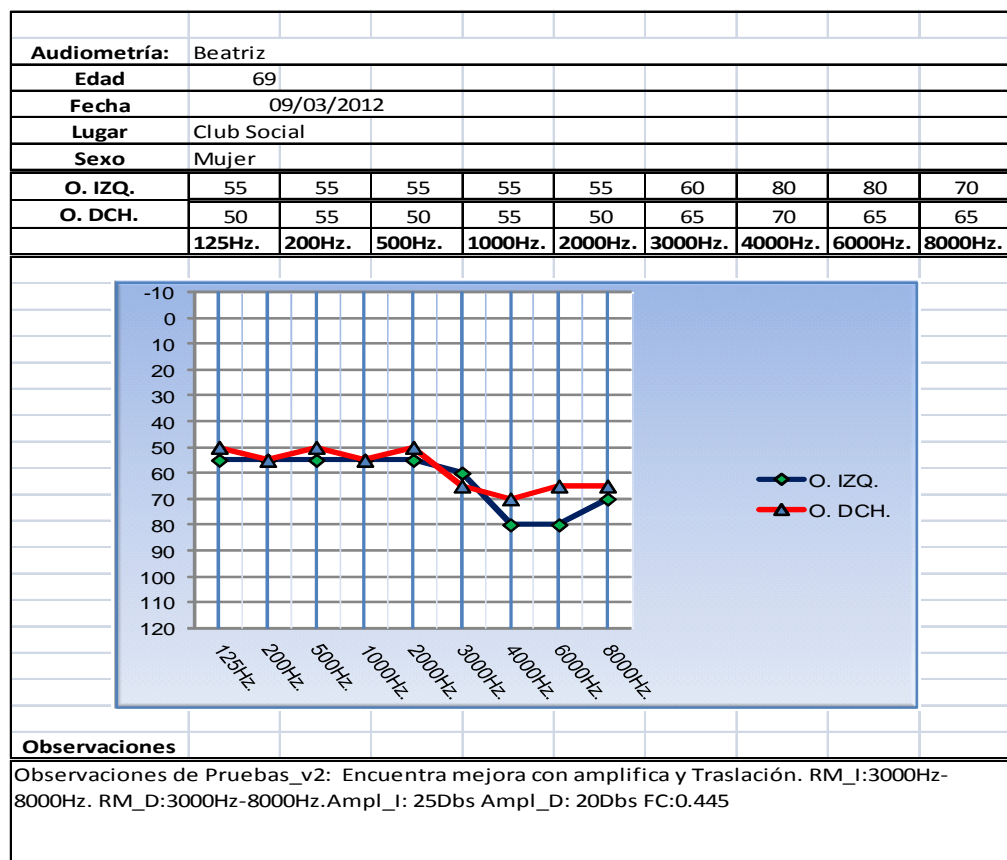
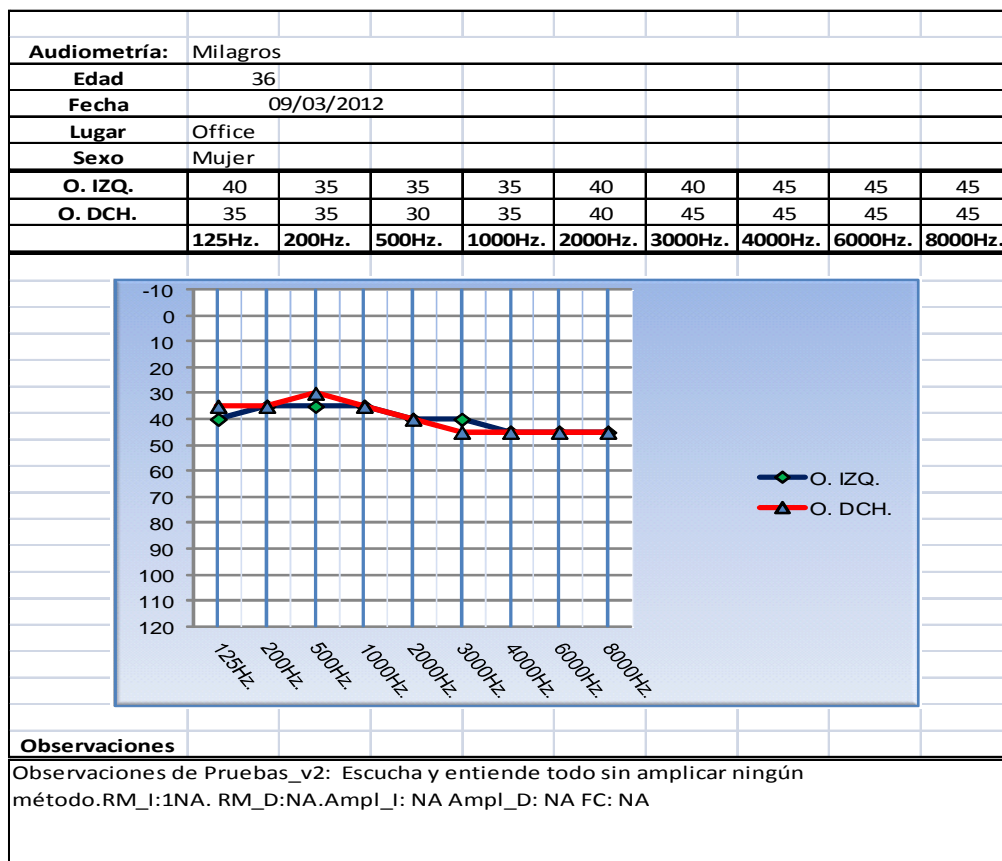


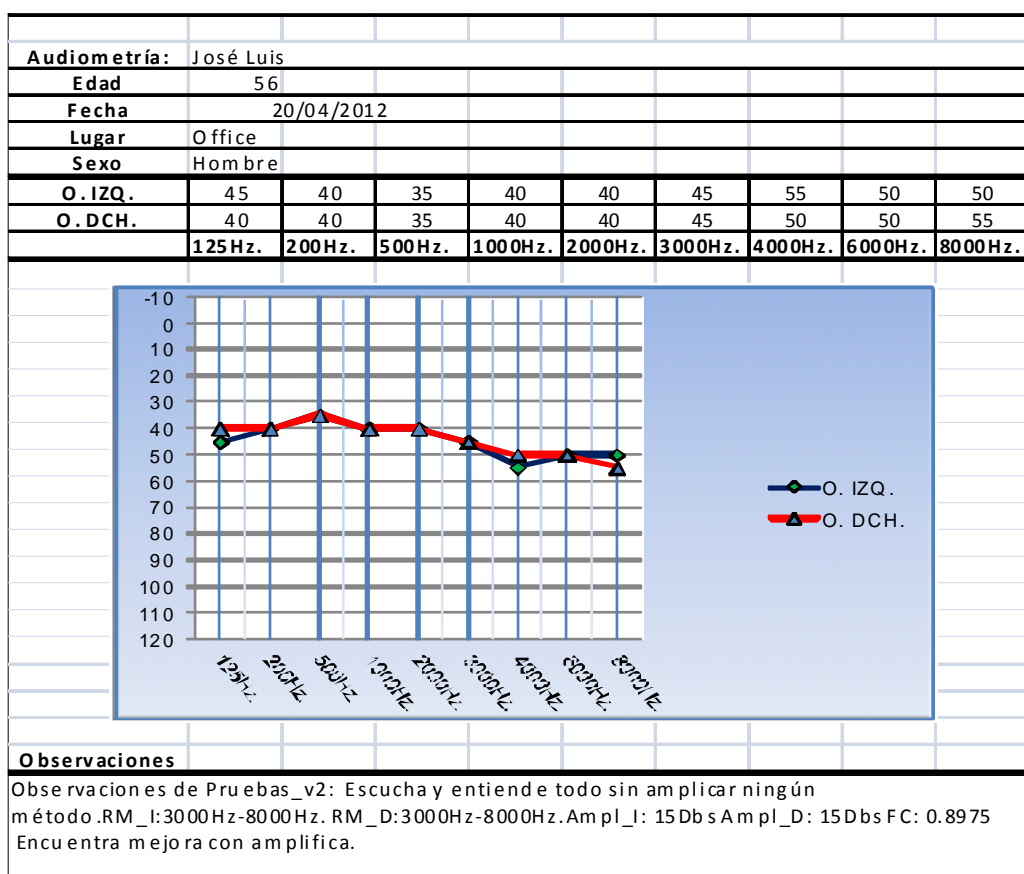
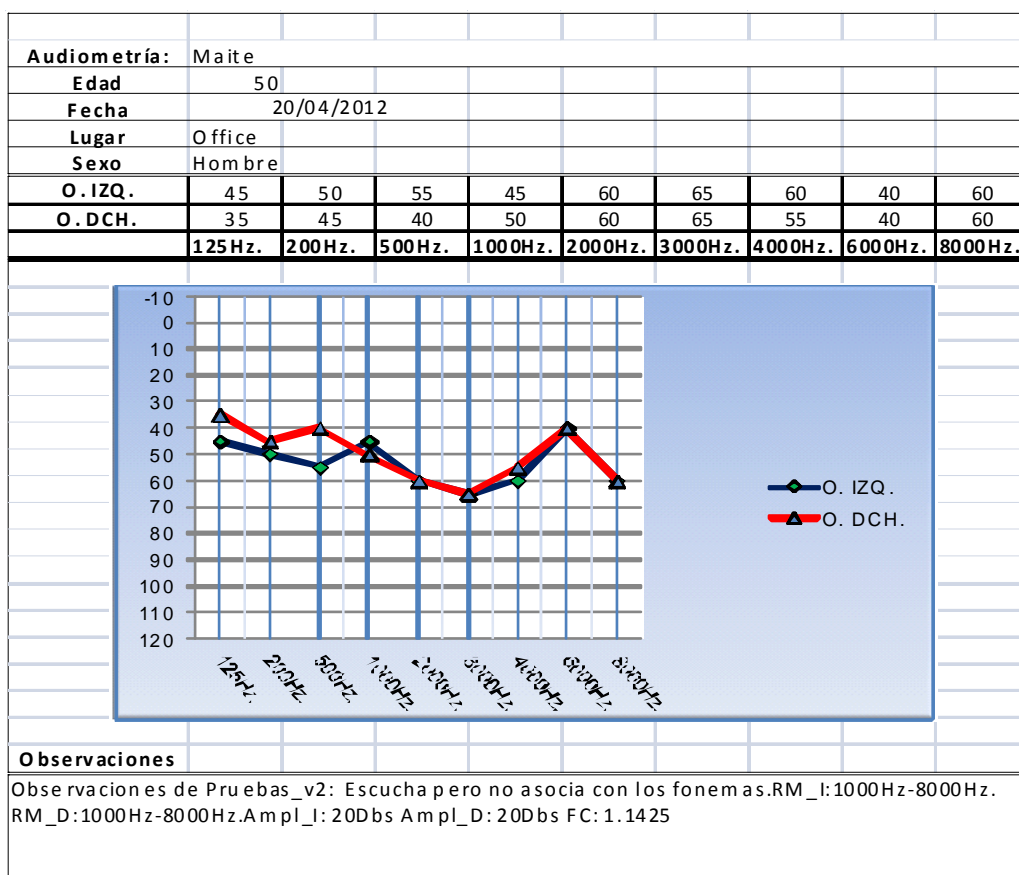


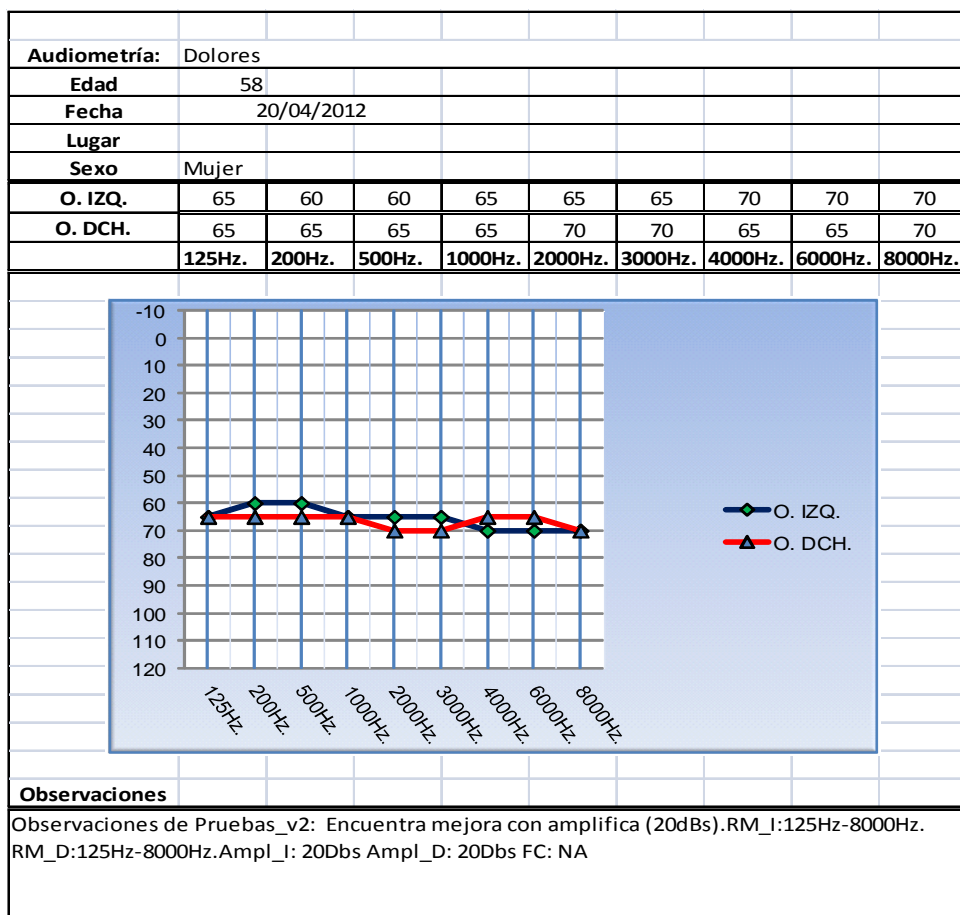
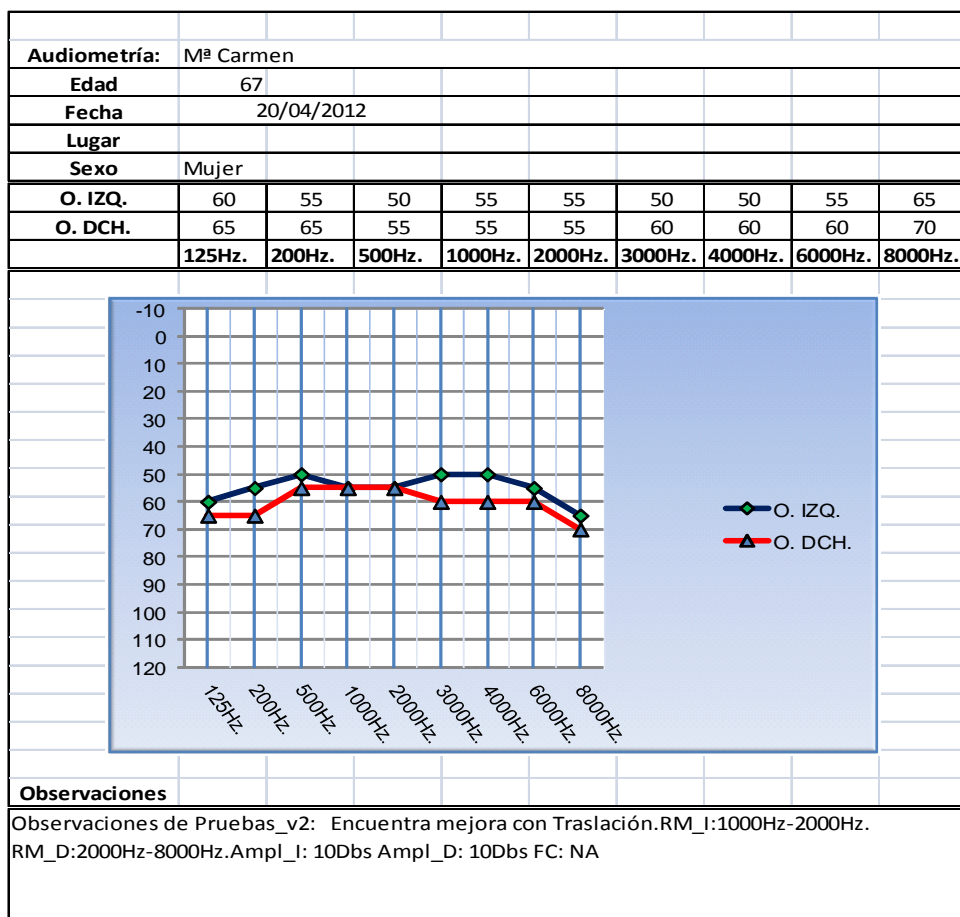


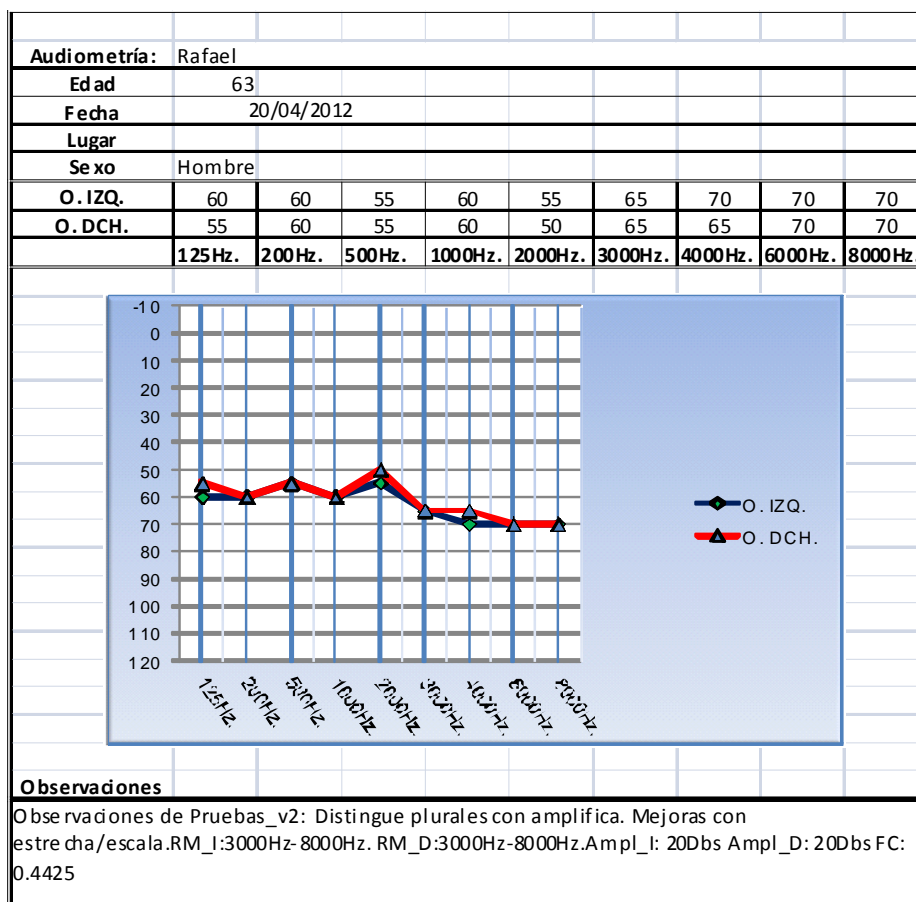
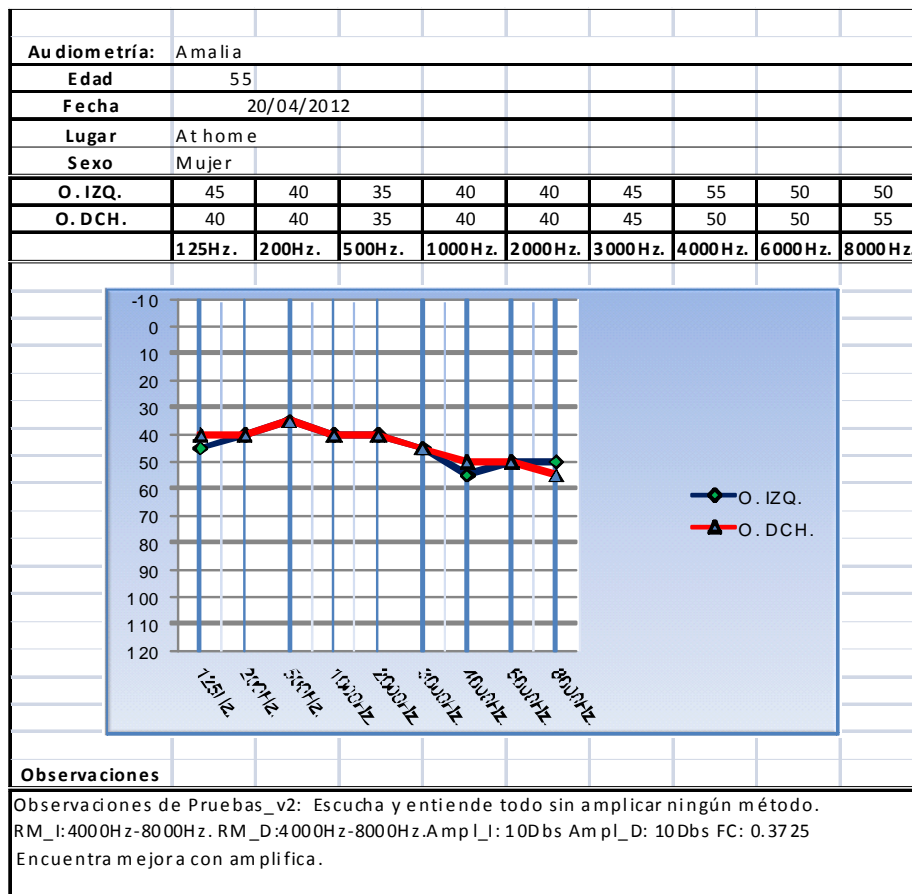


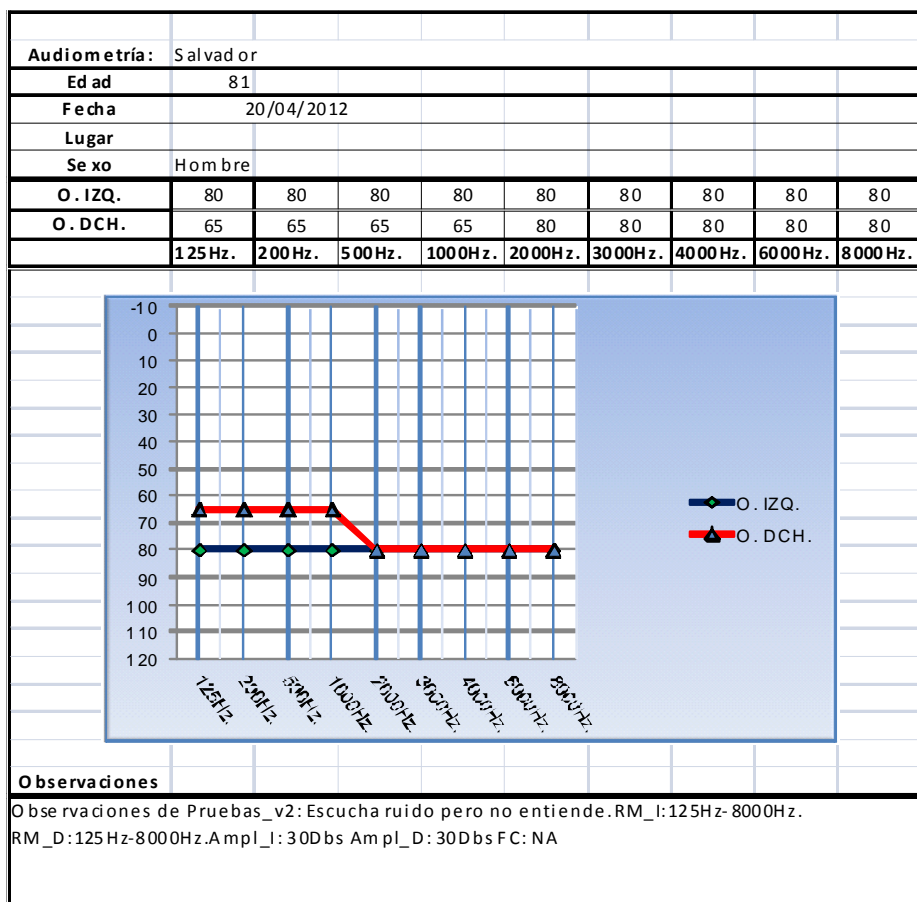
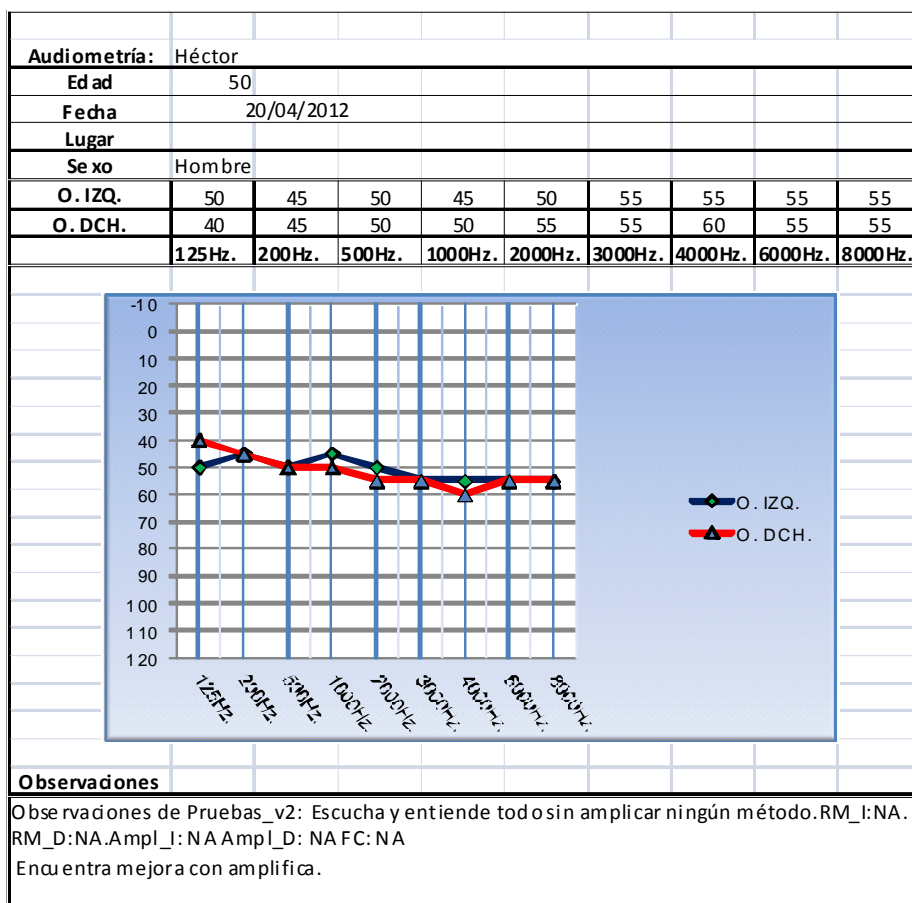


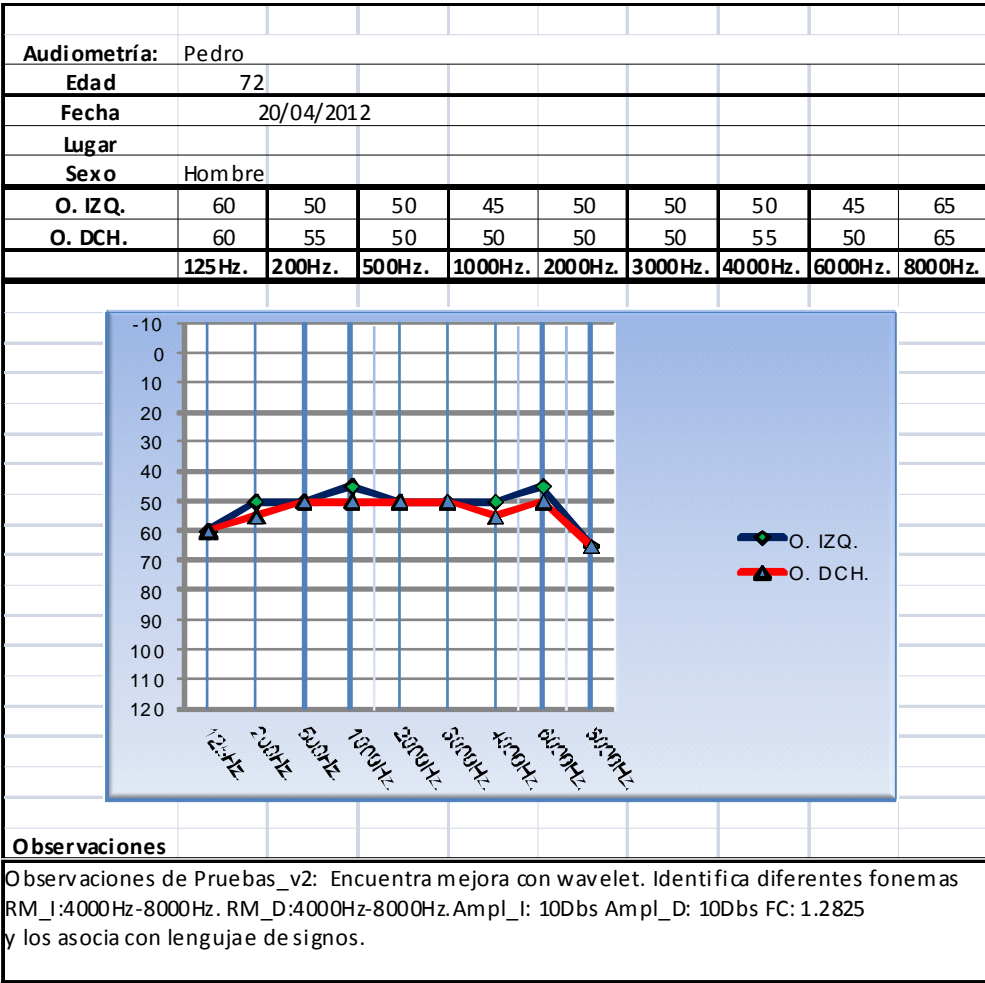












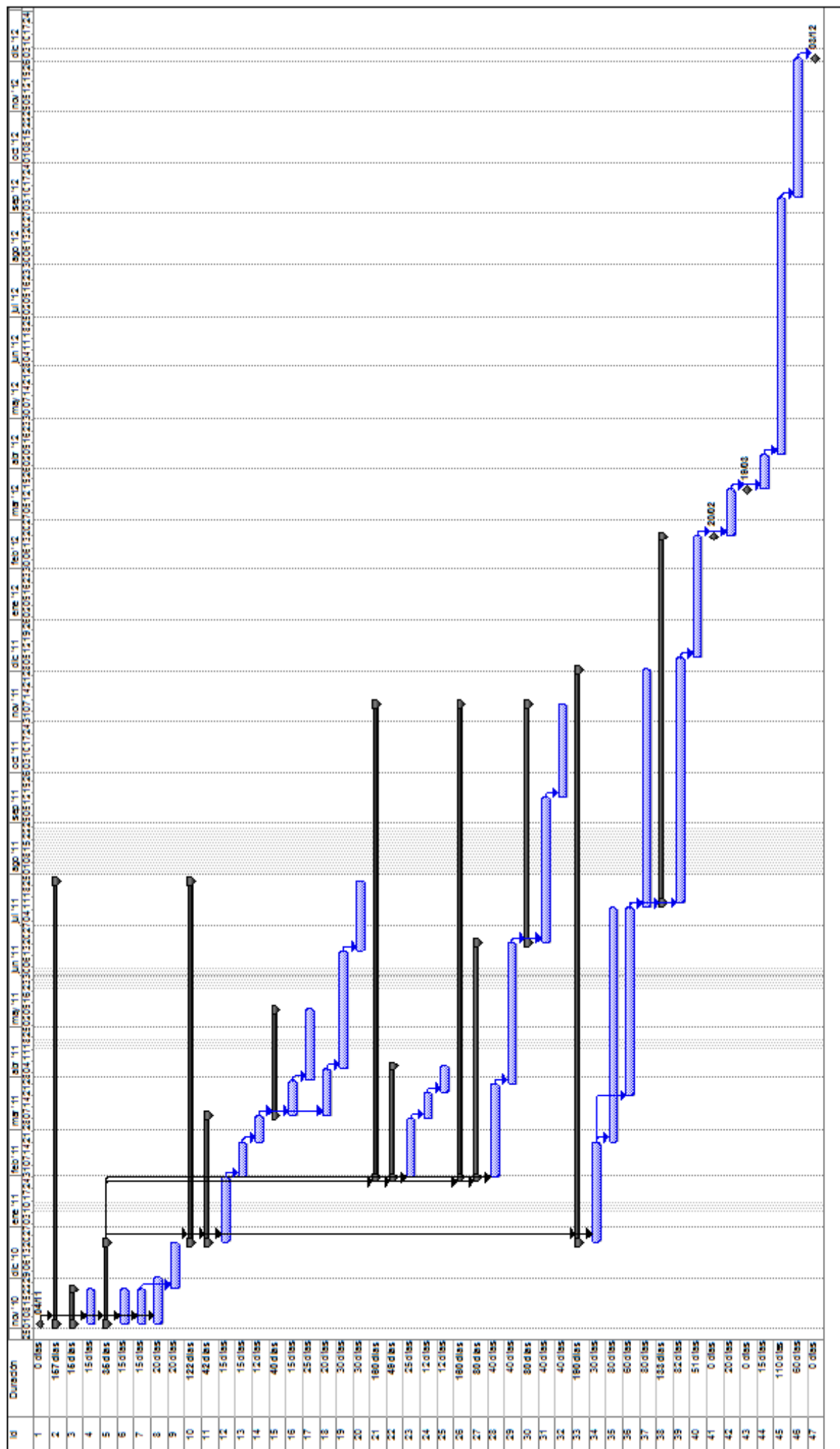
Anexo III

Diagrama Gantt

Hitos	Duración	Fecha inicio	Fecha fin	Predecesor
Hito 1: Inicio del Proyecto	0 días	04/11/2010	04/11/2010	
1.Contextualización	157 días	04/11/2010	28/07/2011	1
1.1.Definición de Objetivos Generales del Proyecto	15 días	04/11/2010	25/11/2010	
1.1.1.Estudio preliminar	15 días	04/11/2010	25/11/2010	1
1.2.Análisis de Requerimientos	35 días	04/11/2010	23/12/2010	1
1.2.1.Herramientas hardware	15 días	04/11/2010	25/11/2010	1
1.2.2.Herramientas de desarrollo	15 días	04/11/2010	25/11/2010	1
1.2.3.Estudios que justifican el proyecto	20 días	04/11/2010	02/12/2010	1
1.2.4.Entorno y herramientas de pruebas	20 días	25/11/2010	23/12/2010	7
1.3.Análisis de Procedimientos	122 días	23/12/2010	28/07/2011	5
1.3.1.Estudio de la herramienta de desarrollo	42 días	23/12/2010	09/03/2011	5
1.3.1.1.Estudio de los lenguajes	15 días	23/12/2010	31/01/2011	5
1.3.1.2.Análisis de características	15 días	31/01/2011	21/02/2011	12
1.3.1.3.Elección de herramienta	12 días	21/02/2011	09/03/2011	13

1.3.2.Estudio de las condiciones auditivas	40 días	09/03/2011	12/05/2011	14
1.3.2.1.Búsqueda de documentación	15 días	09/03/2011	30/03/2011	14
1.3.2.2.Análisis de la información	25 días	30/03/2011	12/05/2011	16
1.3.3.Definición de los casos de prueba	20 días	09/03/2011	06/04/2011	14
1.3.4.Desarrollo e implementación del código	30 días	06/04/2011	16/06/2011	18
1.3.5.Análisis de resultados	30 días	16/06/2011	28/07/2011	19
2.Desarrollo de procedimientos	160 días	31/01/2011	11/11/2011	5FC+15 días
2.1.Propiedades de lenguaje	49 días	31/01/2011	08/04/2011	5
2.1.1. Ejecución de pruebas de lenguaje	25 días	31/01/2011	07/03/2011	5
2.1.2.Análisis de Resultados	12 días	07/03/2011	23/03/2011	23
2.1.3.Conclusiones de la elección	12 días	23/03/2011	08/04/2011	24
2.2.Establecimiento de Características de Audio y Voz	160 días	31/01/2011	11/11/2011	5
2.2.1.Estudio en población sin limitaciones auditivas	80 días	31/01/2011	21/06/2011	5
2.2.1.1.Obtención de parámetros de trabajo	40 días	31/01/2011	28/03/2011	5
2.2.1.2.Determinación de limitaciones auditivas	40 días	28/03/2011	21/06/2011	28
2.2.2.Estudio en población con limitaciones auditivas	80 días	21/06/2011	11/11/2011	29
2.2.2.1.Obtención de parámetros	40 días	21/06/2011	16/09/2011	29
2.2.2.2.Determinación de limitaciones auditivas	40 días	16/09/2011	11/11/2011	31
3.Desarrollo de implementación del código	190 días	23/12/2010	02/12/2011	5
3.1.Módulos de captura de audio	30 días	23/12/2010	21/02/2011	5
3.2.Módulos de procesado de señal de audio	80 días	21/02/2011	12/07/2011	34
3.3.Módulos de reproducción de audio	60 días	21/03/2011	12/07/2011	34FC+20 días
3.4.Montaje de módulos de captura, procesado y reproducción en aplicación para someter a pruebas	80 días	12/07/2011	02/12/2011	36
4. Ejecución de pruebas	120 días	15/07/2011	01/02/2012	36
4.1. Elección muestral de la población con limitaciones auditivas	82 días	15/07/2011	09/12/2011	36FC+3 días
4.2. Realización de pruebas	51 días	09/11/2011	20/02/2012	39

Hito 2: Entrega de Borrador de trabajo	0 días	20/02/2012	20/02/2012	40
5.Análisis de Resultados y Conclusiones	20 días	20/02/2012	19/03/2012	40
Hito 3: Entrega de Documentación	0 días	19/03/2012	19/03/2012	42
6.Estudio comparativo de la aplicación en otras plataformas	15 días	19/03/2012	09/04/2012	42
7.Preparación Documentación (Memoria final Proyecto)	110 días	09/04/2012	10/09/2012	44
8.Entrega Proyecto	60 días	10/09/2012	03/12/2012	45
Hito 4: Fin de proyecto	0 días	03/12/2012	03/12/2012	46



Anexo IV

Calibración

En este anexo se comentan algunas características del equipo técnico utilizado en el desarrollo del proyecto y su sistema de calibración.

Los principales elementos que se utilizan en el proyecto son el ordenador portátil Toshiba y dos auriculares. Además, es necesario mencionar el splitter jack utilizado para poder supervisar la realización de las pruebas a los pacientes.

A continuación, se comentan algunas de las características del equipo técnico del proyecto. El micrófono utilizado para realizar las grabaciones del banco de palabras y frases de pruebas está integrado en el ordenador. Aunque no es el que tiene mejores prestaciones, se utiliza éste por su comodidad y sencillez a la hora de grabar.

Otro de los elementos clave utilizados son los altavoces que también están integrados en el ordenador. Para la realización de las audiometrías y otras pruebas se eligen dos auriculares por sus prestaciones. Los auriculares Senheiser tienen una sensibilidad de 102 dBs, una respuesta en frecuencia de 12Hz-20kHz y una resistencia de 32 ohmios. En cambio los auriculares Phillips tienen una sensibilidad de 105 dBs, una respuesta en frecuencia de 14Hz-24kHz y la misma resistencia.

Debido a que el nivel de intensidad de la señal se mide en decibelios que son adimensionales y relativos, se necesita obtener algunos valores de referencia para que las mediciones sean válidas. Debido a ello, este anexo se centra en la importancia de utilizar altavoces calibrados.

Para calibrar altavoces es necesario utilizar un aparato que genere un sonido estable a una determinada frecuencia para utilizarlo como referencia. El sonómetro que se utiliza,

estima el nivel de ruido en un momento determinado y una vez que se conoce el nivel de ruido ambiental se pueden obtener los niveles de referencia.

En este caso es necesario realizar un calibrado para que el aumento o disminución de intensidad de sonido realizado en las aplicación sea válido y correcto. Para ello, se utiliza una aplicación Android llamada Sound Meter que funciona como un sonómetro. Este medidor de nivel de sonido utiliza el micrófono del teléfono para estimar el nivel de ruido mostrando una referencia en la pantalla del mismo. La gran ventaja de esta aplicación es que está calibrada para los principales modelos y marcas de móviles.



Dicha aplicación funciona como un sonómetro lento, es decir, que su valor promedio es eficaz aproximadamente un segundo y con una precisión de $\pm 1,5$ dBs.

Las estimaciones de dichas mediciones han sido corroboradas al comparar los resultados de las audiometrías con los audiogramas presentados por pacientes realizados en centros auditivos. Por tanto, cuando en la aplicación se aumenta una cantidad de intensidad sonora (dBs) se hace en base al valor de referencia estimado gracias al sonómetro.

Una vez que se ha comentado la calibración del equipo usado en el proyecto, se comentan las limitaciones de éste. Tal y como se ha explicado, las pruebas acústicas no se realizaron con las condiciones más favorables, es decir, no se ha utilizado las herramientas más eficaces, ni en cabinas insonorizadas, por lo que los audiogramas y demás pruebas presentan unos errores de precisión 10-15 dBs respecto a los umbrales de audición normales.